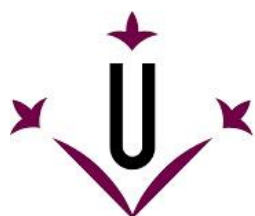


UNIVERSITAT DE LLEIDA
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària



Universitat de Lleida
Departament d'Enginyeria
Agroforestal

TRABAJO FINAL GRADO INGENIERÍA AGRARIA Y ALIMENTARIA

**DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE
FRUTOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRÍA**

Autor: Pol Raduà Castellví

Tutor: Dr. Ricardo Sanz Cortiella

Lleida, Julio de 2020





AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo continuado de Ricardo, incluso durante el periodo de confinamiento por coronavirus, y su confianza en mí para desarrollar un proyecto de investigación y experimentación con grandes perspectivas de futuro.

I a la meva família, perquè sense ells no hagués estat possible.

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (project PAgFRUIT: Precision agriculture technologies to optimize canopy management and sustainable crop protection in fruit orchards. Project code: RTI2018-094222-B-I00).





ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contexto	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Fotogrametría	2
1.4 Introducción al proceso fotográfico	2
1.4.1 Elementos principales en una cámara fotográfica	3
1.4.2 Profundidad de campo	6
1.5 Configuración de la cámara en un escenario frutícola	7
1.5.1 Interrelación de las variables fotográficas	7
1.5.2 Afectación e interacción de las variables fotográficas según la exposición de la luz	7
2. OBJETIVOS	8
3. MATERIAL Y MÉTODOS	9
3.1 Materiales	9
3.1.1 Cámara fotográfica	9
3.1.2 Objetivo	10
3.1.3 Tarjeta de memoria CompactFlash	10
3.1.4 Lector de tarjeta	11
3.1.5 Ordenadores	11
3.1.6 Software	12
3.2 Parámetros fotográficos en la toma fotográfica	13
3.2.1 Distancia de trabajo y de plano focal	14
3.2.2 Superficie del marco de la fruta y del marco de referencia	14
3.2.3 Separación de la fruta respecto el plano de referencia	15
3.2.4 Píxeles marco de la fruta	15
3.2.5 Relación entre píxeles marco de la fruta y píxeles totales	16
3.2.6 Salto de fotos	16
3.2.7 Número de fotogramas horizontal y vertical	16
3.2.8 Solape	16
3.2.9 Velocidad en la toma de fotografías horizontales	17
3.3 Generación de la nube de puntos con el Agisoft Photoscan	18
3.3.1 Nube de puntos poco densa (alineación fotográfica)	18
3.3.2 Nube densa de puntos	18
3.4 Parámetros de la cámara y el escenario fijados	19
3.4.1 Parámetros de la Cámara	19
3.4.2 Escenario	19



3.5 Series fotográficas	20
3.6 Métodos.....	23
3.6.1 Métodos horizontales	23
3.6.2 Métodos combinados	23
3.7 Escalado y comprobación.....	24
3.7.1 Escalado	24
3.7.2 Comprobación escalado	25
3.8 Detección y medición de frutas en CloudCompare	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1 Resultados del estudio del FOV	27
4.1.1 Especificaciones técnicas	27
4.1.2 Cálculo FOV teórico	28
4.1.3 Comprobación del FOV teórico.....	29
4.1.4 Distancia focal efectiva	30
4.2 Ejemplo práctico hoja excel “Cálculo de los Parámetros Fotográficos para la Detección de Fruta”	32
4.3 Resultados del estudio de configuración del Agisoft Photoscan.....	38
4.3.1 Exactitud en la alineación fotográfica de la nube poco densa	38
4.3.2 Límite de key points y tie points en la alineación fotográfica de la nube poco densa	39
4.3.3 Calidad de la nube densa	40
4.3.4 Profundidad de filtraje de la nube densa	41
4.3.5 Parámetros Agisoft Photoscan para la comparación de los chunks.....	41
4.4 Estudio del comportamiento del Agisoft Photoscan	42
4.4.1 Efecto número de fotos por chunk	42
4.4.2 Efecto del salto de foto	42
4.4.3 Efecto del ISO	43
4.4.4 Efecto del tamaño y calidad de imagen.....	43
4.4.5 Tamaño del chunk	44
4.4.6 Objetos alineados o en profundidades distintas	45
4.5 Estudio del número de puntos mínimos en RSD	47
4.6 Forma de la fruta.....	49
4.7 Resultados detección y caracterización geométrica	51
4.8 Discusión resultados detección y caracterización geométrica	61
4.8.1 Tamaño de la fruta según la dt	61
4.8.2 Métodos según la dt.....	61
5. CONCLUSIONES.....	63



6. BIBLIOGRAFÍA	64
7. ANEXOS.....	65
7.1 Especificaciones técnicas de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.....	65
7.2 Trabajo realizado para la obtención del FOV empírico en las distintas escenas	68
7.3 Demostración de la relación del factor de multiplicación	77



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Representación de la toma de tres fotografías de un paisaje con mayor y menor captura de luz del sensor. Sobreexpuesta (a), expuesta (b) y subexpuesta (c).....	2
Fig. 2. Representación de la situación de los elementos principales de una cámara fotográfica.....	3
Fig. 3. Representación de la calidad de la imagen según el valor del parámetro ISO, 100 (a), 400 (b), 1600 (c), 3200 (d), en una manzana de 8 cm de ancho y 7 de alto.....	3
Fig. 4. Representación del concepto de distancia focal.....	4
Fig. 5. Representación de un objetivo de distancia focal fija de 35 mm (a) y distancia focal variable de 28-70 mm (b).....	4
Fig. 6. Representación del obturador.....	5
Fig. 7. Representación de distintas configuraciones del diafragma del objetivo.....	5
Fig. 8. Representación de una profundidad de campo pequeña (a) y grande (b).....	6
Fig. 9. Cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.....	9
Fig. 10. Objetivo Nikon, modelo AF NIKKOR 20 mm f/2.8 y sus especificaciones técnicas.....	10
Fig. 11. Tarjeta SanDisk Extreme PRO 32 GB CompactFlash UDMA 7 con una velocidad de hasta 160MB/s.....	10
Fig. 12. Lector de tarjetas Transcend TS-RDP8K y el cable USB.....	11
Fig. 13. Representación esquemática del concepto FOV del marco de referencia.....	13
Fig. 14. Representación del marco de referencia y marco distancia fruta delimitados por el FOB y del marco fruta.....	14
Fig. 15. Representación de marcos de fruta de una manzana y de un racimo de uvas.....	14
Fig. 16. Representación del solape horizontal (a) y vertical (b) (superficie rayada), siendo la distancia del sfh igual a la del sfv.....	16
Fig. 17. Representación de la identificación de un tie point a partir de 2 fotografías.....	18
Fig. 18. Representación de la escena fotografiada.....	19
Fig. 19. Representación del nivel bajo (a,d,g), medio (b,e,h) y alto (c,f,i), a una dt de 1 m (a,b,c), 2 m (d,e,f) y 3 m (g,h,i).....	21
Fig. 20. Representación de las marcas en una fotografía del chunk.....	24
Fig. 21. Representación de la distancia definida entre puntos y el error de escala.....	24
Fig. 22. Representación de los puntos y de las distancias en la nube densa de puntos.....	24
Fig. 23. Representación de la distancia entre puntos de la anchura (a) y la altura (b) de la fruta Mediana.....	25
Fig. 24. Representación de una nube densa de puntos (a) y la detección y caracterización de frutas en la misma nube de puntos con el RSD (b).....	26
Fig. 25. Representación de los parámetros fijados en la herramienta RSD.....	26
Fig. 26. Representación de las especificaciones técnicas del objetivo Nikon, modelo AF NIKKOR 20mm f/2.8.....	27
Fig. 27. Representación del tamaño del sensor de la cámara, y de la obtención de la mitad de la Diagonal.....	28
Fig. 28. Representación de la mitad del ángulo diagonal de la cámara.....	28
Fig. 29. Representación de la marca del plano focal de nuestra cámara.....	29
Fig. 30. Representación de las entradas objetivo y dimensiones sensor y de las salidas FOV Teórico....	33
Fig. 31. Representación de las entradas distancia de trabajo y de las salidas base y altura del Marco de Referencia.....	33
Fig. 32. Representación de las entradas dimensión marco fruta de estudio y de las salidas superficie marco fruta y referencia.....	34
Fig. 33. Representación de la entrada separación de la fruta respecto plano de referencia y de la salida de la base y la altura del marco distancia fruta.....	34
Fig. 34. Representación de la entrada píxeles horizontales y verticales y de la salida píxeles totales, píxeles anchura y altura marco fruta, píxeles marco fruta y relación pxf/pxt.....	35



Fig. 35. Representación de la entrada salto de foto horizontal y vertical y de la salida de valores de solape y de número de fotogramas.....	36
Fig. 36. Representación de la entrada velocidad del tractor y de la salida velocidad en la toma de fotografías horizontales.....	36
Fig. 37. Representación de la entrada longitud y altura hilera frutales fotografiada y de la salida total fotografías por hilera.....	37
Fig. 38. Representación de la nube de puntos de 3 chunks (de 6 fotografías por chunk), con baja (a), media (b) y alta exactitud (c).....	38
Fig. 39. Representación de 9 imágenes con su respectiva nube densa de puntos, según el número de fotografías por chunk y la calidad de la nube densa.....	40
Fig. 40. Representación de una nube de puntos con el modo mild (a) y agresive (b) del parámetro de profundidad de filtraje.....	41
Fig. 41. Representación de la visualización de la manzana con los modos de profundidad de filtraje mild (a), moderate (b) y agresive (c).....	41
Fig. 42. Representación de la visualización de la manzana, en chunks con 2 (a), 3 (b), 4 (c), 5 (d) y 6 (e) Fotografías.....	42
Fig. 43. Representación de la diferencia de identificación de tie points entre fotos con un salto de foto pequeño (a) y fotos con un salto fotográfico mayor (b).....	42
Fig. 44. La fotografía 3013 (a) se encuentra en medio de la serie fotográfica y tiene 546 puntos tie points, mientras que la fotografía 3011 (b) se encuentra al lateral de la serie fotográfica y tiene 351 tie points válidos.....	42
Fig. 45. Representación de la nube de puntos de dos chunks con dos fotografías de ISO 100 (a) y dos fotografías de ISO 3200 (b).....	43
Fig. 46. Representación de las nubes densas de puntos procesadas con imágenes con el mismo número de píxeles (12,1 megapíxeles) pero con calidades de imagen distintas, Normal (a) y Fine (b).....	43
Fig. 47. Representación de las nubes densas de puntos procesadas con imágenes con la misma calidad de imagen (Normal) pero con distinto número de píxeles, 12,1 megapíxeles (a) y 3,54 megapíxeles (b).....	44
Fig. 48. Representación de la nube de puntos de la manzana central a 1 m de dt sin añadir manzanas (a), con frutos alineados (b) y sin frutos alineados (c).....	45
Fig. 49. Representación de la nube de puntos de la manzana central a 2 m de dt sin añadir manzanas (a), con frutos alineados (b) y sin frutos alineados (c).....	46
Fig. 50. Representación de la nube de puntos de la manzana central a 3 m de dt sin añadir manzanas (a), con frutos alineados (b) y sin frutos alineados (c).....	46
Fig. 51. Representación de la nube de puntos de la manzana mediana a 1 m (a) 2 m (b) y 3 m (c) dt.....	47
Fig. 52. Representación de la nube de puntos de la manzana pequeña a 1 m de dt, con 100 puntos mínimos (a) y 500 puntos mínimos (b).....	47
Fig. 53. Representación de la nube de puntos manzana grande a una dt de 1 m (a), 2 m (b) y 3 m (c) con el RSD con 50 puntos mínimos.....	47
Fig. 54. Representación de la nube de puntos con el método lineal con una dt de 2 m, 5 fotos y un salto de foto de 50 cm (a), y las detecciones de las frutas con 100 puntos mínimos (b), 50 (c) y 25 (d).....	48
Fig. 55. Representación de la detección de la fruta grande a 3 m de dt con el método de la cruz mediante 25 puntos mínimos del RSD (a), 50 puntos mínimos (b) y 100 puntos (c).....	49
Fig. 56. Representación de la nube de puntos de la fruta mediana a una dt de 1 m con el método lineal, 9 fotos, salto de foto de 10 cm (a) y las dimensiones de la esfera detectada con el RSD (b).....	49
Fig. 57. Representación de la nube de puntos de la fruta grande a una dt de 1 m con el método lineal, 5 fotos, salto de foto de 20 cm (a) y las dimensiones de la esfera detectada con el RSD (b).....	50
Fig. 58. Representación de la nube de puntos de la fruta grande a una dt de 1 m con el método lineal, 3 fotos, salto de foto de 30 cm (a) y las dimensiones de la esfera detectada con el RSD (b).....	50



Fig. 59. Representación de las especificaciones técnicas del sistema de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.....	65
Fig. 60. Representación de las especificaciones técnicas del sistema de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.....	65
Fig. 61. Representación de las especificaciones técnicas de los terminales de entrada y salida y de alimentación de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.....	66
Fig. 62. Representación de las especificaciones técnicas de la capacidad de la tarjeta de memoria y de la calidad/tamaño de la imagen de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.....	66
Fig. 63. Representación de las especificaciones técnicas de la capacidad de la tarjeta de memoria y de la calidad/tamaño de la imagen de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.....	67
Fig. 64. Representación del uso del nivel para la nivelación horizontal del marco.....	68
Fig. 65. Representación del uso del nivel para la nivelación vertical del marco.....	68
Fig. 66. Representación de la posición de la cámara frente al marco.....	69
Fig. 67. Representación de la marca del plano focal justo a 102 cm de la pared lisa.....	69
Fig. 68. Representación del marco de referencia de la pared a distancia del plano focal de 102 cm.....	70
Fig. 69. Representación del uso del nivel para la nivelación horizontal del marco.....	71
Fig. 70. Representación del uso del nivel para la nivelación vertical del marco.....	71
Fig. 71. Comprobación de la nivelación del plano de soporte de la cámara.....	72
Fig. 72. Representación de los ejes del encuadre fotográfico del marco a distancia de trabajo de 2 m.....	72
Fig. 73. Representación del marco de referencia de la pared a distancia del plano focal de 202 cm.....	73
Fig. 74. Representación de los ejes del encuadre fotográfico del marco a una distancia de 3 m.....	74
Fig. 75. Representación de la posición de la cámara frente al marco a una distancia de 3 m.....	74
Fig. 76. Representación del marco de referencia de la pared a distancia del plano focal de 302 cm.....	75
Fig. 77. Representación del marco de referencia de la pared a una distancia del plano focal de 302 cm con el enfoque del objetivo de largas distancias.....	76
Fig. 78. Representación del tamaño del sensor de la cámara Full Frame, y de la obtención de la mitad de la diagonal.....	77
Fig. 79. Representación de la mitad del ángulo diagonal de una cámara Full Frame.....	77
Fig. 80. Representación de la relación entre la mitad del ángulo diagonal de la cámara utilizada (imagen izquierda) y de la cámara Full Frame (imagen derecha).....	78
Fig. 81. Representación en planta de la captación del mismo ángulo horizontal, mediante un factor de relación entre cámaras con sensores y objetivos distintos.....	78
Fig. 82. Representación del perfil de la captación del mismo ángulo vertical, mediante un factor de relación entre cámaras con sensores y objetivos distintos.....	79



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Representación de la relación entre la profundidad de campo y parámetros fotográficos.....	6
Tabla 2. Representación de los 3 tamaños de imagen de la cámara.....	9
Tabla 3. Representación del tamaño de archivo en megabytes según la calidad y el tamaño de imagen de la cámara Fujifilm utilizada.....	10
Tabla 4. Representación de las propiedades del portátil 1.....	11
Tabla 5. Representación de las propiedades del portátil 2.....	11
Tabla 6. Representación de los valores de las 3 frutas de estudio.....	20
Tabla 7. Representación del número total de fotos realizadas.....	20
Tabla 8. Representación del número de fotogramas horizontal final en que aparece el fruto de estudio por serie y distancia, con un salto de foto horizontal de 10 cm.....	20
Tabla 9. Representación del salto de foto vertical realizado a cada dt.....	22
Tabla 10. Representación del FOV teórico obtenido mediante la dimensión del sensor y de la distancia focal del objetivo.....	29
Tabla 11. Representación de la comparación del FOV teórico obtenido mediante la dimensión del sensor y de la distancia focal del objetivo y el FOV empírico a una distancia de trabajo 1 m, 2 m y 3 m con el enfoque respectivo y a 3 m con el enfoque de largas distancias.....	30
Tabla 12. Representación de los datos de entrada de la hoja de cálculo.....	32
Tabla 13. Representación del tiempo (calculado con el portátil 1) de alineación y de formación de la nube densa de puntos variando la exactitud de alineación en chunks con distintos núm. de fotografías.....	38
Tabla 14. Representación de los valores (calculado con el portátil 1) de los chunks variando el límite de tie points.....	39
Tabla 15. Representación del tiempo (calculado con el portátil 1) del proceso de alineación fotográfica y de formación de la nube densa de puntos, variando la calidad de la nube densa con distintos núm. de fotografías por chunk.....	40
Tabla 16. Representación del tamaño del documento de texto del chunk según los puntos de nube densa.....	44
Tabla 17. Representación de los puntos mínimos utilizados para la detección de esferas según la dt en la toma de fotografías de la nube de puntos.....	49
Tabla 18. Valores de los tres tamaños de fruta a las tres distancias de la relación píxeles marco de la fruta entre píxeles totales (%) y del número de píxeles del marco de la fruta con una separación de la fruta respecto el plano de referencia de 20 cm. Calculados en la pestaña FOV Empírico de la hoja de cálculo.....	51
Tabla 19. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 1m de dt de fruta pequeña con los 5 métodos aplicados.....	52
Tabla 20. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 1 m de dt de fruta mediana con los 5 métodos aplicados.....	53
Tabla 21. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 1 m de dt de la fruta grande con los 5 métodos aplicados.....	54
Tabla 22. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 2 m de dt de la fruta pequeña con los 5 métodos aplicados.....	55
Tabla 23. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 2 m de dt de la fruta mediana con los 5 métodos aplicados.....	56
Tabla 24. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 2 m de dt de la fruta grande con los 5 métodos aplicados.....	57
Tabla 25. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 3 m de dt de la fruta pequeña con los 5 métodos aplicados.....	58
Tabla 26. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 3 m de dt de fruta mediana con los 5 métodos aplicados.	59



Tabla 27. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 3 m de dt de la fruta grande con los 5 métodos aplicados.....	60
Tabla 28. Representación de la comparación FOV teórico obtenido mediante la dimensión del sensor y de la distancia focal del objetivo y el FOV empírico a una distancia de trabajo de 1 m.....	70
Tabla 29. Representación de la comparación FOV teórico obtenido mediante la dimensión del sensor y de la distancia focal del objetivo y el FOV empírico a una dt de 1 m y 2 m.....	73
Tabla 30. Representación de la comparación FOV teórico obtenido mediante la dimensión del sensor y de la distancia focal del objetivo y el FOV empírico a una dt de 1 m, 2 m y 3 m.....	75



LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Sigla/Acrónimo	Expresión Compleja
h	Altura (m)
he	Altura Empírica (m)
hh	Altura Hilera Frutales Fotografiada (m)
hmdf	Altura del Marco Distancia Fruto (m)
hf	Altura Marco Fruta (cm)
hs	Altura Sensor Cámara (mm)
af	Anchura Marco Fruta (cm)
as	Anchura Sensor Cámara (mm)
α_d	Ángulo del Objetivo Diagonal (°)
α_h	Ángulo del Objetivo Horizontal (°)
α_v	Ángulo del Objetivo Vertical (°)
b	Base (m)
be	Base Empírica (m)
bmdf	Base del Marco Distancia Fruto (m)
dufv	Centímetros del Último Fotograma en 1a Altura (cm)
dufh	Centímetros del Último Fotograma en 1a Base (cm)
dfe	Distancia Focal Efectiva (mm)
df	Distancia Focal Objetivo (mm)
dfruto	Distancia Fruta (Fruta - Punto Nodal) (m)
dpf	Distancia Plano Focal (Plano de Referencia - Plano Focal) (m)
dt	Distancia Trabajo (Plano de Referencia - Punto Nodal) (m)
fm	Factor de Multiplicación
FOV	Field of View
y	Hipotenusa (m)
ISO	International Organization of Standardization
lh	Longitud Hilera Frutales Fotografiada (m)
h/2	Mitad Altura (m)
b/2	Mitad Base (m)
nfh	Número de Fotograma Horizontal



nfhf	Número de Fotograma Horizontal Final
nfhr	Número de Fotograma Horizontal Redondeado
nft	Número de Fotograma Total
nfv	Número de Fotograma Vertical
nfvf	Número de Fotograma Vertical Final
nfvr	Número de Fotograma Vertical Redondeado
px	Píxeles
pxhf	Píxeles Altura Marco Fruta (px)
pxaf	Píxeles Anchura Marco Fruta (px)
pxh	Píxeles Horizontales (px)
pxf	Píxeles Marco Fruta
pxt	Píxeles Totales (px)
pxv	Píxeles Verticales (px)
RANSAC	<i>Random Sample Consensus</i>
RSD	RANSAC Shape Detection
sfh	Salto de Foto Horizontal (m)
sfv	Salto de Foto Vertical (m)
sfruta	Separación de la Fruta respecto Plano de Referencia (m)
sh	Solape Horizontal (m ²)
shtf	Solape Horizontal Total Fruta (m ²)
sv	Solape Vertical (m ²)
svtf	Solape Vertical Total Fruta (m ²)
Af	Superficie Marco Fruta (m ²)
Ar	Superficie Marco Referencia (m ²)
tfh	Total Fotografías por Hilera
vf	Velocidad en la Toma de Fotos Horizontales (fotografías/s)
vt	Velocidad del Tractor (km/h)



RESUM

La decreixent disponibilitat i l'elevat cost de la mà d'obra en les explotacions agrícoles obliga l'estudi i desenvolupament de sistemes de mecanització i automatització. La detecció i caracterització de fruits utilitzant tècniques de fotogrametria pretén ser una alternativa a la quantificació i mesurament manual de fruita.

S'ha utilitzat l'algoritme RANSAC per a la detecció i caracterització de fruits. Per a facilitar el funcionament de l'algoritme s'ha de generar un núvol de punts representatiu. Conseqüentment, s'hauran de prendre fotografies ben exposades, no mogudes i ben enfocades (combinant correctament les variables fotogràfiques segons l'escenari fotografiat) i ajustar els paràmetres del programa Agisoft Photoscan.

En aquest treball s'han descrit els paràmetres fotogràfics que intervenen en la generació del núvol de punts i s'ha desenvolupat una fulla de càlcul que automatitza els valors dels paràmetres (número de fotogrames, píxels marc fruita, velocitat en la presa de fotos horitzontals i total fotografies per filera) segons les dades escollides de la sèrie fotogràfica i les especificacions de la càmera.

Amb els resultats obtinguts, s'observa que l'augment de la distància de treball és un factor crític en la detecció i caracterització de fruita. Per a mitigar aquest problema es recomana utilitzar càmeres fotogràfiques amb una resolució d'imatge superior.



RESUMEN

La decreciente disponibilidad y el elevado coste de mano de obra en las explotaciones agrícolas obliga el estudio y desarrollo de sistemas de mecanización y automatización. La detección y caracterización de frutos utilizando técnicas de fotogrametría pretende ser una alternativa a la cuantificación y medición manual de fruta.

Se ha utilizado el algoritmo RANSAC para la detección y caracterización de frutos. Para facilitar el funcionamiento del algoritmo se tiene que generar una nube de puntos representativa. Para ello, se tendrán que tomar fotografías bien expuestas, no movidas y bien enfocadas (combinando correctamente las variables fotográficas según el escenario fotografiado) y ajustar los parámetros del programa Agisoft Photoscan.

En este trabajo se han descrito los parámetros fotográficos que intervienen en la generación de la nube de puntos y se ha desarrollado una hoja de cálculo que automatiza los valores de los parámetros (número de fotogramas, píxeles marco fruta, velocidad en la toma de fotos horizontales y total fotografías por hilera) según los datos escogidos de la serie fotográfica y las especificaciones de la cámara.

Con los resultados obtenidos, se observa que el aumento de la distancia de trabajo es un factor crítico en la detección y caracterización de fruta. Para mitigar este problema se recomienda utilizar cámaras fotográficas con una resolución de imagen mayor.



ABSTRACT

The decreasing availability and the high cost of labour in the farming activity forced the study and development of mechanization and automation systems. The detection and characterization of fruits through photogrammetric techniques pretend to be an alternative to manual fruit counting and measuring.

It has been used the RANSAC algorithm for detection and characterization of fruits. For a better algorithm process, it is recommended to generate a representative point cloud. Therefore, it has to be taken an exposed, non-moved and focused photos (correctly combining the photographic variables according to the photographed scene) and to adjust Agisoft Photoscan software parameters.

In this project it has been described the photographic parameters that are involved in the point cloud generation and it has been developed a spreadsheet to obtain the values of the parameters (number of frames, pixels fruit frame, speed on taking horizontal photos and total line per photos) according to selected data of the photographic series and the camera specifications.

With the obtained results, it has been realized that the increment of the working distance is a critical factor in fruit detection and characterization. To fix this problem, it is recommended to use a camera with a higher image resolution.



1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo introductorio se contextualiza el marco del trabajo y sus antecedentes, se define el concepto de fotogrametría, se presenta una breve introducción al proceso fotográfico y se comentan los aspectos a tener en cuenta a la hora de configurar la cámara fotográfica en un escenario frutícola.

1.1 Contexto

En las comarcas de Ponent hay una alta producción de fruta de hueso, manzanos y perales, siendo esta zona una de las máximas exportadoras de estos productos a los países centrales y nórdicos de Europa. Es por este motivo que se trata de un sector muy importante en términos socioeconómicos.

Actualmente, el desarrollo tecnológico y los conocimientos frutícolas permiten el estudio de nuevas prácticas agrícolas, con la intención de mejorar los rendimientos (t/ha) de cosecha, la calidad de vida y la competitividad de los agricultores (Iglesias, 2019).

Mediante la ciencia fotogramétrica, el uso de softwares y la aplicación del algoritmo RANSAC (*random sample consensus*) se pretende detectar frutos esféricos y determinar su diámetro. Para realizar el estudio se simulará en un escenario interior en casa escenas con distintos objetos de forma esférica en diferentes posiciones y agrupaciones simulando una posible situación en campo. La comparación de los resultados entre las mediciones reales y las obtenidas con los softwares determinará la fiabilidad del sistema de detección y caracterización geométrica.

El uso de la fotogrametría es una técnica que se utiliza frecuentemente en ámbitos, como el forestal y la cartografía. En el sector agrícola su uso es menor y existe cierto interés en vincularla en el sector. En el apartado “1.4 Introducción al proceso fotográfico”, se exponen conceptos de fotografía a tener en cuenta para poder realizar fotografías de buena calidad en el ámbito de la fotogrametría.

1.2 Antecedentes

Se han realizado estudios de la caracterización geométrica de árboles frutales con sistemas basados con ultrasonidos, técnicas de fotografía digital, sensores de luz, imágenes radar de alta resolución, tomografía computarizada de rayos X de alta resolución, visión estereó y sensores LiDAR (*light detection and ranging*). La caracterización geométrica de los árboles frutales puede ser beneficiosa en tareas agrícolas, como la aplicación de pesticidas, irrigación y la fertilización (Rosell-Polo y Sanz, 2012).

Mediante el desarrollo de un algoritmo se puede estimar con imágenes en color, obtenidas con cámaras fotográficas, el número de manzanas en árboles frutales bajo la luz natural. Obteniendo una detección correcta del 85% de las manzanas y un valor alto de falsos positivos, detectados bajo varias condiciones de iluminación. Y una detección correcta del 95% de frutos y menos de un 5% de falsos positivos mediante fotografías tomadas con luz difusa, durante el atardecer (Linker et al., 2012).

Se ha generado un sistema de visión que puede medir los parámetros de árboles frutales en campo (recuento de frutas, volumen del dosel, diámetro del tronco y altura del árbol) mediante un modelo 3D generado con la información RGB proporcionada con una cámara fotográfica (Wenbo et al., 2019).

Según el profesor Manoj Karkee del centro de precisión y automatización de sistemas agrícolas, de la universidad Washington State, a pesar de los avances, desarrollo y conocimientos generados en estudios recientes, todavía no ha habido un éxito comercial destacado utilizando tecnología robótica para la recolección de fruta. Las limitaciones del uso de brazos robóticos son la falta de velocidad, exactitud y robustez, pueden propiciar daños al árbol o fruta durante la recolección y su alto coste.



1.3 Fotogrametría

A continuación, se exponen dos definiciones de fotogrametría:

La American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) definió en el 1979 la fotogrametría como “el arte, ciencia y tecnología cuyo fin es el de obtener información cuantitativa fiable relativa a objetos físicos y su entorno, a través de registro, medida e interpretación de imágenes fotográficas”

La International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) define la fotogrametría como “la ciencia capaz de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de fotografías, para la obtención de características métricas y geométricas del objeto fotografiado”.

En este trabajo se ha utilizado la fotogrametría porque permite generar modelos de puntos 3D a partir de fotografías. Y mediante las nubes de puntos se puede medir indirectamente (sobre las imágenes) las frutas de estudio y detectar con el algoritmo RANSAC.

1.4 Introducción al proceso fotográfico

En el ámbito frutícola se busca obtener fotografías con buena exposición (Fig. 1b), ni muy oscuras (Fig. 1c) ni muy quemadas (Fig. 1a), y con un enfoque y nitidez adecuado al proceso fotogramétrico posterior.

No interesan fotografías subexpuestas ni sobreexpuestas porque se pierde información y detalles, imposibles de recuperar mediante edición con softwares.

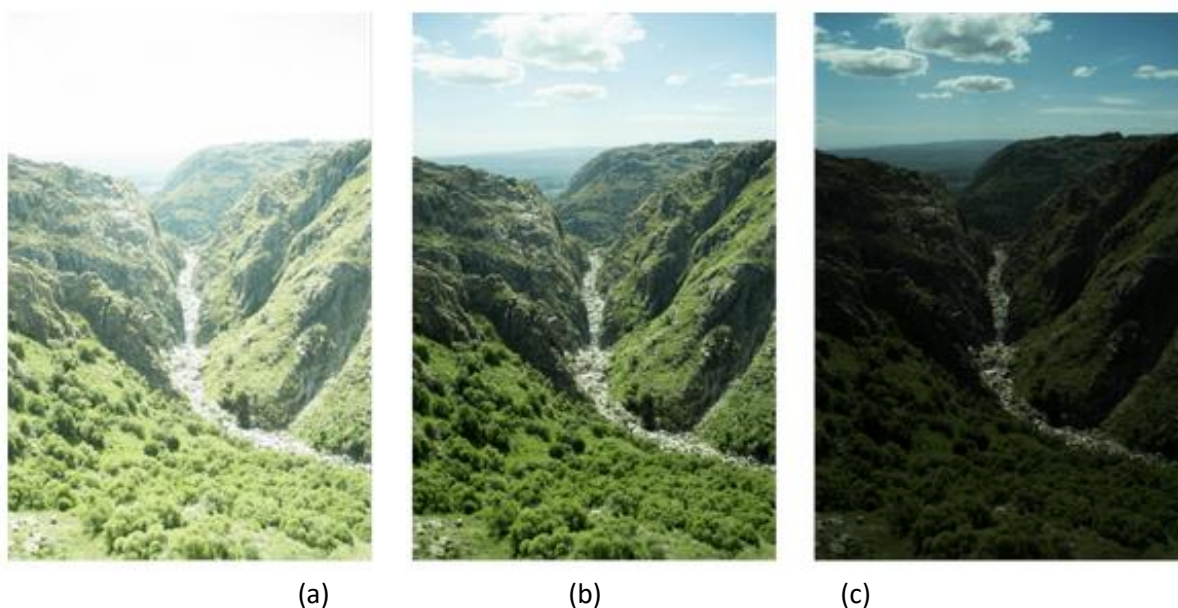


Fig. 1. Representación de la toma de tres fotografías de un paisaje con mayor y menor captura de luz del sensor. Sobreexpuesta (a), expuesta (b) y subexpuesta (c).

<https://www.blogdelfotografo.com/medicion-exposicion/>



1.4.1 Elementos principales en una cámara fotográfica

A continuación, se describen una serie de elementos destacados del hardware de una cámara fotográfica. Los elementos principales de una cámara fotográfica se exponen en la Fig. 2.



Fig. 2. Representación de la situación de los elementos principales de una cámara fotográfica.

<https://fotocursonet.wordpress.com/2010/11/13/partes-de-la-camara-2/>

- Sensor

Es un dispositivo capaz de convertir la luz recibida en señales eléctricas que mediante el procesador se creará la imagen.

- ISO

Se trata de un parámetro variable que afecta la sensibilidad del sensor fotográfico. Los valores de la cámara utilizada en el proyecto están entre 100 (Fig. 3a) y 3200 (Fig. 3b). Los saltos se duplican, tratándose de una progresión geométrica de factor 2. Los valores de la ISO bajos reducen la sensibilidad del sensor, mientras que los valores ISO mayores provocan un aumento de la sensibilidad del sensor, pero sacrificando la calidad de las fotografías. En la Fig. 3 se muestra el efecto del ISO con la cámara utilizada en el TFG.

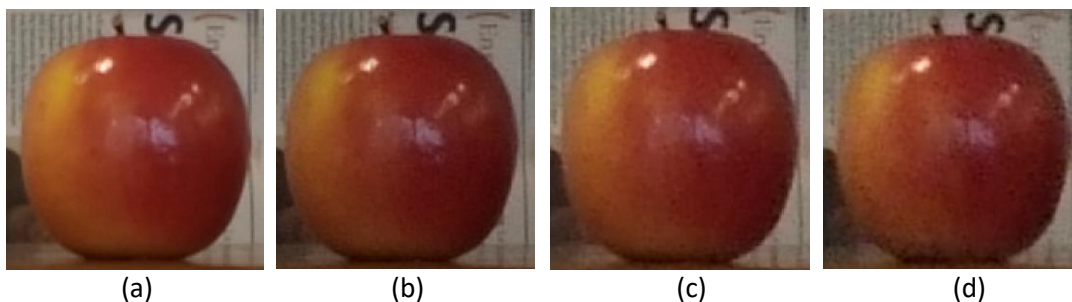


Fig. 3. Representación de la calidad de la imagen según el valor del parámetro ISO, 100 (a), 400 (b), 1600 (c), 3200 (d), en una manzana de 8 cm de ancho y 7 de alto.



- Objetivos

En función de la distancia focal se pueden clasificar los objetivos de distancia focal fija y los objetivos de distancia focal variable o zooms, definidos a continuación. La **distancia focal**, corresponde a la distancia óptica en milímetros desde el punto donde los rayos de luz convergen o punto nodal hasta la formación de una imagen nítida del objeto fotografiado en el plano focal (Fig. 4).

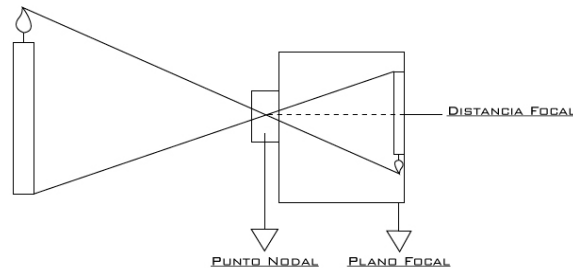


Fig. 4. Representación del concepto de distancia focal.

Los objetivos de distancia focal fija (Fig. 5a) no permiten variar la distancia focal del objetivo. Los objetivos de distancia focal fija tienen una mayor calidad óptica respecto los zooms.

Los objetivos de distancia focal variable (Fig. 5b), como indica el nombre, pueden cambiar la distancia focal desplazando la posición de las lentes, permitiendo modificar el ángulo de visión (porción de escena capturada) y el aumento (tamaño de los elementos).



Fig. 5. Representación de un objetivo de distancia focal fija de 35 mm (a) y distancia focal variable de 28-70 mm (b). <https://www.canon.es/lenses/rf-lenses/>

- Fotómetro

Es el sensor que mide la cantidad de luz percibida. Tratándose del punto de partida de la fotografía, ya que según la luz van a variar los parámetros del ISO, diafragma y obturador.



- Obturador

El obturador es el dispositivo (Fig. 6), instalado delante del sensor, capaz de controlar el tiempo que el sensor capturar  luz. El obturador está formado por dos láminas, representado en la figura 1. Primero baja una lámina abriendo el obturador y seguidamente, según el tiempo programado, la segunda lámina baja cerrándolo. Produciendo que entremedias haya un tiempo donde la luz es capturada. Los tiempos de obturación de la cámara utilizada en el TFG varían desde 1/8000 segundos hasta 30 segundos.

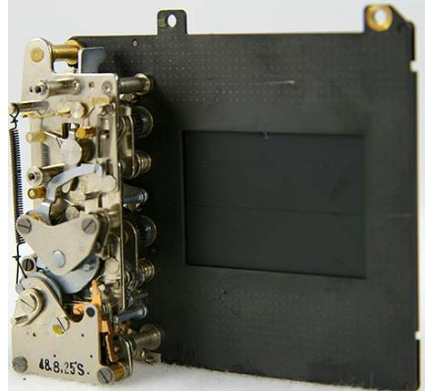


Fig. 6. Representación del obturador. <https://todo-fotografia.com/tecnica/el-obturador/>

- Diafragma

El diafragma es un mecanismo que forma parte del objetivo. Su función es similar a la del iris de los ojos. Es un orificio de tamaño configurable que determina la cantidad de luz que llega al sensor. Destacar que los valores del diafragma dependen de cada objetivo. En la Fig. 7, se representan posibles configuraciones del diafragma. Los valores del diafragma del objetivo utilizado en el TFG son: f/2,8, f/3,2, f/3,5, f/4, f/4,5, f/5, f/5,6, f/6,3, f/7,1, f/8, f/9, f/10, f/11, f/13, f/14, f/16, f/18, f/20, f/22.

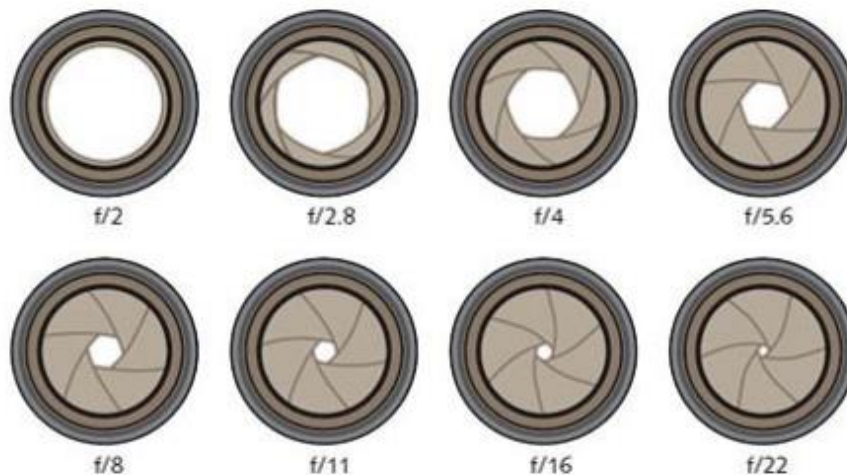


Fig. 7. Representación de distintas configuraciones del diafragma del objetivo. <https://www.blogdelfotografo.com/apertura-diafragma/>



1.4.2 Profundidad de campo

La profundidad de campo es el espacio nítido que sale representada en la fotografía del objeto o sujeto fotografiado. El total de la profundidad de campo se reparte aproximadamente de la siguiente manera, 1/3 parte por delante del plano enfocado y 2/3 partes por detrás. En la Fig. 8, se muestran unos objetos fotografiados con distinta profundidad de campo.

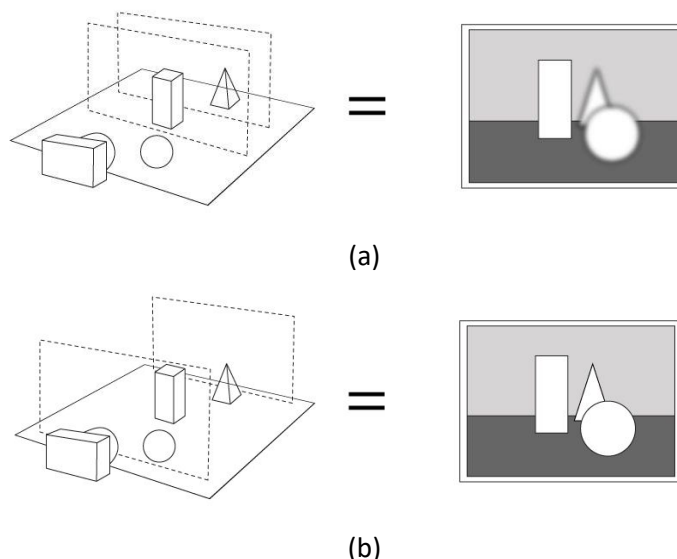


Fig. 8. Representación de una profundidad de campo pequeña (a) y grande (b).

<https://www.rubixephoto.com/2015/02/10/el-enfoque-en-fotografia-que-es-y-como-hacerlo-i/>

Las variables que influyen en la profundidad de campo son el diafragma, la distancia entre la cámara y el objeto y la distancia focal. Tal como se representa en la Tabla 1, si se desea capturar una profundidad de campo mayor se tendrá que disminuir la apertura del diafragma, aumentar la distancia entre la cámara y el objeto y utilizar un objetivo con una distancia focal inferior. Mientras que si se quiere obtener una menor profundidad de campo se tendrá que hacer lo contrario, aumentar la apertura del diafragma, reducir la distancia entre la cámara y el objeto y utilizar un objetivo con una distancia focal mayor.

Tabla 1. Representación de la relación entre la profundidad de campo y parámetros fotográficos.

Profundidad de Campo	Parámetros fotográficos		
	Diafragma (f)	Distancia cámara - objeto	Distancia focal
Mayor	f/mayor ó disminución de apertura	Mayor	Corta (menor Zoom)
Menor	f/menor ó aumento de apertura	Menor	Larga (mayor Zoom)

<https://www.dzoom.org.es/la-profundidad-de-campo-como-elemento-compositivo/>



1.5 Configuración de la cámara en un escenario frutícola

1.5.1 Interrelación de las variables fotográficas

En la toma de fotografías dentro de las hileras de manzanos interesa que la profundidad de campo sea alta. De este modo el espesor de la zona fotografiada será mayor y quedarán nítidos o enfocados todos los elementos como tronco, ramas, hojas, flores, frutos.

La configuración de la cámara se realizará partiendo de la base de que, cuando el sistema funcione, las fotografías serán tomadas en campo a una distancia de entre 2-3 m de las hileras de manzanos y en un medio de transporte (tractor, quad, dron) que estará en movimiento.

Por lo tanto, la cercanía a las hileras de manzanos será una limitación importante en la consecución de una buena profundidad de campo. Ya que cuanto más cerca esté la cámara del objeto o sujeto, menor es la profundidad de campo.

Para solucionar este inconveniente se tendrá que trabajar con diafragmas cerrados y con grandes angulares (distancia focal pequeña).

Se tiene que tener en cuenta que con un diafragma cerrado va a pasar poca luz, por lo que se va a tener que compensar con un tiempo de exposición suficiente para que el sensor capte la luz requerida y obtener así una fotografía correctamente expuesta.

Destacar que cuando el tiempo del obturador es elevado no se puede realizar la fotografía a pulso porque saldría movida y se tiene que utilizar un trípode. Suponiendo que la cámara se sitúe en un soporte de un tractor, se tendrá que determinar la velocidad de obturación que permita obtener fotografías no movidas. En el supuesto que haya muchos baches se probaría con un tiempo del obturador menor. Si con la reducción del tiempo del obturador la fotografía quedase subexpuesta, será necesario subir el valor ISO para aumentar la sensibilidad del sensor y conseguir una fotografía correctamente expuesta.

1.5.2 Afectación e interacción de las variables fotográficas según la exposición de la luz

Definida la interrelación entre las distintas variables fotográficas a continuación se discute como se ven afectadas con la exposición de la luz.

Según la luz que se disponga a la hora de realizar las fotografías se pueden plantear distintos escenarios y discutir sus ventajas y desventajas. La luz de un escenario se puede clasificar según la cantidad, la calidad y la dirección de la luz.

Respecto la cantidad de luz, interesa tener cuanto más mejor, ya que permite más margen de maniobra en la configuración de la cámara. Mientras que si hay poca luz es más complicado que la fotografía quede correctamente expuesta y con calidad suficiente.

La toma de fotografías en un escenario con mucha luz permitirá cerrar el diafragma, ganando profundidad de campo. Se podrá escoger una obturación más rápida. Y una ISO menor, con menos sensibilidad y mayor calidad.

La toma de fotografías en un escenario con poca luz provocará que se tenga que elegir un diafragma más abierto, y una obturación más lenta. Para que la foto salga bien expuesta, no movida y con profundidad de campo adecuada será necesario utilizar una ISO mayor. Teniendo en cuenta, que empeorará la calidad de la fotografía.



La calidad de la luz vendrá dada según el contraste. En días despejados las sombras serán muy intensas, generando mucho contraste. En cambio, en días nublados las sombras generarán menos contraste. Se tendrá que valorar si tener mucho contraste es bueno o malo para nuestros objetivos fotogramétricos.

La dirección de la luz dependerá de la posición del sol respecto la cámara fotográfica. Cuando el sol está de cara o a contraluz genera más problemas que cuando el sol está de espaldas. Aunque si el sol está justo detrás de la cámara, se generarán sombras momentáneas que crearán problemas en el proceso fotogramétrico.

Finalmente, el buen desempeño en la combinación de las variables fotográficas en cada escenario va a permitir obtener fotografías bien expuestas, no movidas y bien enfocadas, facilitando una mejor detección y caracterización de frutos esferoidales mediante los softwares empleados. Pudiendo llegar a ser esta herramienta una alternativa a la medición manual de fruta. Suponiendo un ahorro en el coste de mano de obra en la explotación agrícola.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo final de grado es conocer los parámetros fotográficos que intervienen durante la toma de fotografías. Comprender como afectan en la generación de la nube de puntos del programa Agisoft Photoscan y en la detección y dimensionado de frutas con el algoritmo RANSAC incluido en el programa CloudCompare.

Desarrollo de una hoja Excel que permita automatizar el cálculo de la interacción de los parámetros fotográficos.



3. MATERIAL Y MÉTODOS

En este capítulo se describe los materiales utilizados, los parámetros fotográficos que intervienen en la toma fotográfica, cómo se genera la nube de puntos con el Agisoft Photoscan, los parámetros de la cámara y el escenario utilizado, las series fotográficas realizadas, los métodos en que se agrupan las fotografías para la formación de nubes de puntos, cómo se escala una nube de puntos y la detección y medición en el CloudCompare.

3.1 Materiales

A continuación, se exponen los materiales requeridos para la realización del TFG.

3.1.1 Cámara fotográfica

Se ha trabajado con la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro (Fig. 9). En el apartado de los anexos “7.1 Especificaciones técnicas de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro” se representan todas las especificaciones de la cámara.



Fig. 9. Cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.

- Tamaño y calidad de imagen

La cámara que utilizamos dispone la opción de realizar 3 tamaños de imagen (cantidad de píxeles) distintas (Tabla 2). Como mayor sea el tamaño de la imagen, mayor será el tamaño del archivo (medido en megabytes, MB).

Tabla 2. Representación de los 3 tamaños de imagen de la cámara.

Tamaño de imagen	Píxeles
L	(4256 x 2848) 12,1 MP
M	(3024 x 2016), 6,1 MP
S	(2304 x 1536), 3,54 MP

Otro parámetro a escoger de la cámara es la calidad de imagen. Las utilizadas son, la Fine JPG y la Normal JPG. La Fine graba imágenes JPG en calidad alta (relación de compresión baja). La Normal graba imágenes JPG en calidad estándar (relación de compresión estándar). Como menor sea la compresión, mayor será el tamaño del archivo.

En la Tabla 3 se relaciona la calidad y el tamaño de la imagen con el tamaño del archivo.



Tabla 3. Representación del tamaño de archivo en megabytes según la calidad y el tamaño de imagen de la cámara Fujifilm utilizada (Fujifilm, 2007).

Calidad de imagen	Tamaño de imagen	Tamaño de archivo (MB)
Fine JPG	L	Aprox. 5,3
	M	Aprox. 3,5
	S	Aprox. 2,2
Normal JPG	L	Aprox. 2,9
	M	Aprox. 2.0
	S	Aprox. 1,4

En el apartado de resultados y discusión “4.4.4 Efecto del tamaño y calidad de imagen” se estudia el efecto del tamaño y la calidad de imagen.

3.1.2 Objetivo

Para la realización del TFG se ha utilizado el objetivo Nikon, modelo AF NIKKOR 20 mm f/2.8, representado en la Fig. 10 con sus especificaciones técnicas.



Distancia focal	20 mm
Diafragma máximo	f/2.8
Diafragma mínimo	f/22
Construcción del objetivo	12 elementos en 9 grupos
Ángulo de visión	94° (70° con el formato DX de Nikon)
Distancia de enfoque mínima	0,25 m

Fig. 10. Objetivo Nikon, modelo AF NIKKOR 20 mm f/2.8 y sus especificaciones técnicas. https://www.nikon.es/es_ES/product/nikkor-lenses/auto-focus-lenses/fx/single-focal-length/af-nikkor-20mm-f-2-8d#tech_specs

3.1.3 Tarjeta de memoria CompactFlash

La tarjeta utilizada para guardar las fotografías realizadas por la cámara es la SanDisk Extreme PRO de 32 GB CompactFlash UDMA 7 (Fig. 11) con una velocidad de hasta 160 MB/s.



Fig. 11. Tarjeta SanDisk Extreme PRO 32 GB CompactFlash UDMA 7 con una velocidad de hasta 160 MB/s.



3.1.4 Lector de tarjeta

Para enviar las imágenes guardadas en la tarjeta de memoria CompactFlash al ordenador se ha utilizado el lector de la tarjeta Tratrascend TS-RDP8K y un cable USB (Fig. 12).



Fig. 12. Lector de tarjetas Transcend TS-RDP8K y el cable USB.

3.1.5 Ordenadores

Para el desarrollo informático se han utilizados 2 portátiles y un ratón con puerto USB. Portátil 1 y portátil 2, en la Tabla 4 y Tabla 5 se muestran las características de ambos ordenadores. Destacar que el portátil 1 requería mucho más tiempo en los cálculos que el portátil 2.

Tabla 4. Representación de las propiedades del portátil 1.

Elemento del Sistema	Valor
Fabricante del Sistema	Apple Inc.
Modelo del Sistema	MacBookAir 6.1
Sistema Operativo	Microsoft Windows 8.1
Tipo de Sistema	64 bits
Procesador	Intel® Core™ i5-4260 U CPU 1.40 GHz
Memoria Instalada (RAM)	4,00 GB
Tarjeta Gráfica	Intel® HD Graphics 5000

Tabla 5. Representación de las propiedades del portátil 2.

Elemento del Sistema	Valor
Fabricante del Sistema	LENOVO
Modelo del Sistema	81V5
Sistema Operativo	Microsoft Windows 10 Enterprise
Tipo de Sistema	64 bits
Procesador	AMD Ryzen 3 3200 U with Radeon Vega Mobile Gfx 2.60 GHz
Memoria Instalada (RAM)	8,00 GB
Tarjeta Gráfica	AMD Radeon™ Vega 3 Graphics



3.1.6 Software

El software utilizado en este trabajo es el siguiente;

- Agisoft PhotoScan: Software de procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y generación de nubes de puntos en 3D (Agisoft y St Petersburg, 2017). Permite la reconstrucción de escenas capturadas con la cámara fotográfica mediante nube de puntos. La versión utilizada ha sido Agisoft PhotoScan Professional Version 1.4.1 (64 bit). El nombre oficial actual de las nuevas versiones es Agisoft Metashape.
- CloudCompare: Software de procesamiento de nube de puntos 3D. Permite el tratamiento, medición y la comparación de nubes de puntos. La versión utilizada ha sido CloudCompare^{v2}2.10.2 (64bit).
 - Automatic RANSAC (*RAN*dOm *SA*mple *C*onsensus) Shape Detection: Herramienta del programa CloudCompare. El RANSAC es un algoritmo publicado el 1981 por Fischler and Bolles que se utiliza para el análisis de imágenes. Permite encontrar un modelo matemático en datos contaminados con un gran número de valores no ajustados al modelo (*outliers*) (Fischler y Bolles, 1981). En este trabajo se utiliza el algoritmo RANSAC para detectar y medir esferas en nubes de puntos.



3.2 Parámetros fotográficos en la toma fotográfica

A continuación, se presentan los parámetros fotográficos generados en la toma de fotografías en campo o en la escena de estudio. Para automatizar los resultados generados en la interacción de los parámetros fotográficos se ha diseñado una hoja de cálculo Excel “Cálculo de los Parámetros Fotográficos para la Detección de fruta”. Expuesta en el apartado de resultados y discusión.

Prevía explicación de los parámetros fotográficos, se define el concepto Field of View (FOV) y los planos y marcos fotográficos a tener en cuenta:

- El FOV es la zona observable a través de la cámara fotográfica (Fig. 13). Viene determinado por el objetivo y el sensor del dispositivo. En el apartado “4.1 Resultados del estudio del FOV” se describen los pasos a seguir para conocer el FOV del dispositivo fotográfico utilizado.

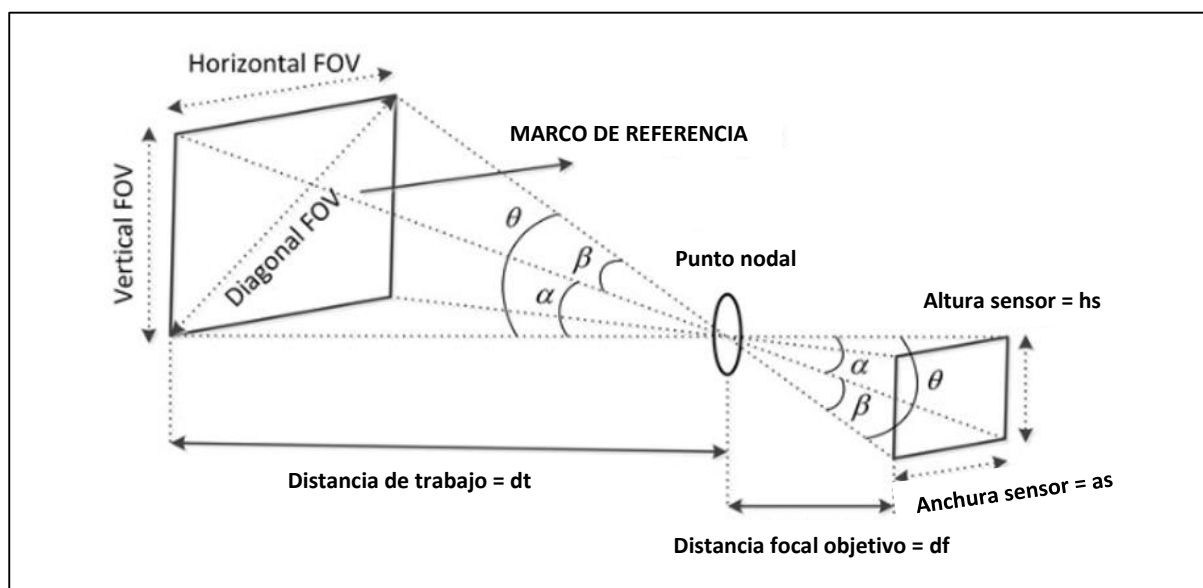


Fig. 13. Representación esquemática del concepto FOV del marco de referencia.

- Plano de referencia: plano imaginario que corta por el medio la hilera de plantación. En los estudios realizados en casa el plano de referencia es la pared.
 - o Marco de Referencia: área del plano de referencia que se muestra en la fotografía (Figs. 13 y 14).
- Plano distancia fruta: plano imaginario que corta por el medio la fruta de estudio. El plano distancia fruta está separado del plano de referencia a una distancia sfruta (separación de la fruta respecto el plano de referencia).
 - o Marco distancia fruta: área del plano distancia fruta que se muestra en la fotografía (Fig. 14)
 - o Marco fruta: área delimitada por la anchura (af) y la altura (hf) de la fruta (Fig. 14). El marco fruta se encuentra en el plano distancia fruta.

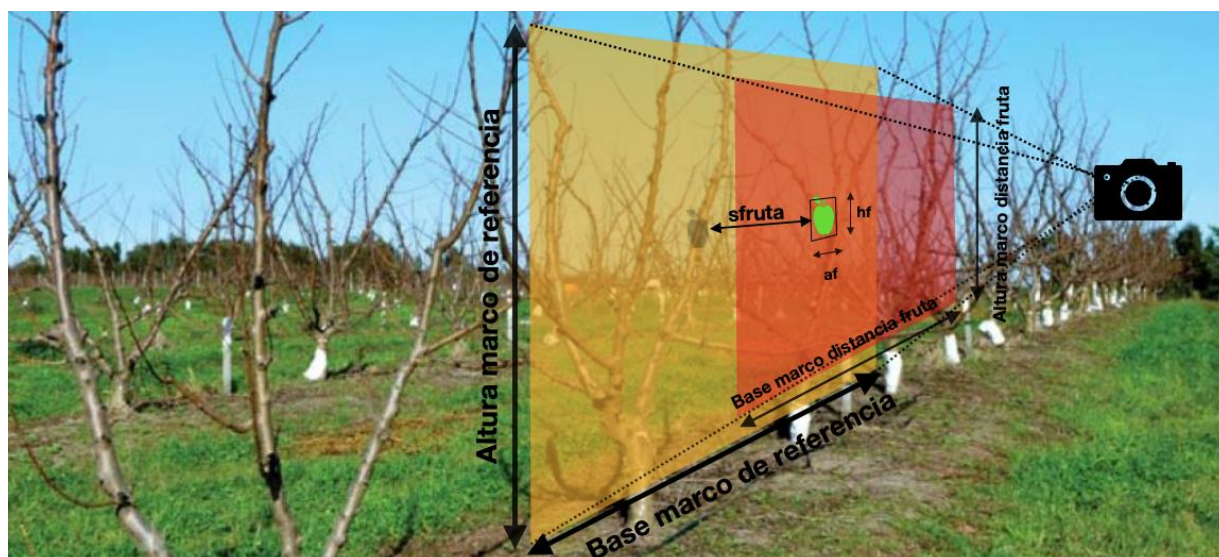


Fig. 14. Representación del marco de referencia y marco distancia fruta delimitados por el FOB y del marco fruta.

3.2.1 Distancia de trabajo y de plano focal

La distancia de trabajo (dt) es la longitud desde el plano de referencia hasta al punto nodal de la cámara (Fig. 13).

La distancia de plano focal (d_{pf}) es la longitud desde el plano de referencia hasta el plano focal, $d_{pf} = dt + df$ (Fig. 13).

3.2.2 Superficie del marco de la fruta y del marco de referencia

La superficie del marco de la fruta (A_f) es el área definida por la anchura del marco de la fruta (af) y la altura del marco la fruta (hf). El marco de la fruta de estudio se fija previamente, con la anchura y la altura de la fruta. En la Fig. 15 se muestran marcos de fruta en una manzana y en un racimo de uvas.

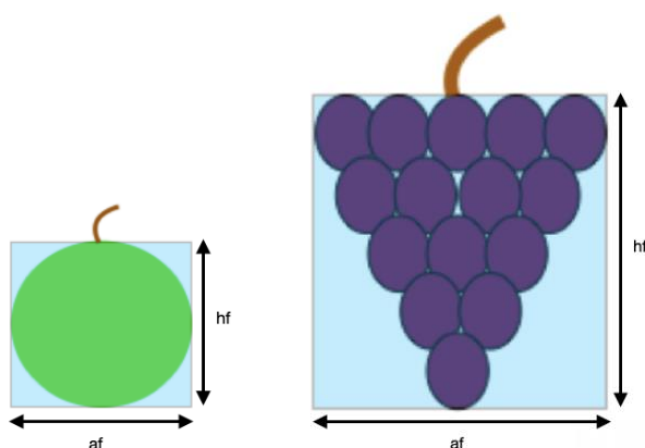


Fig. 15. Representación de marcos de fruta de una manzana y de un racimo de uvas.



La superficie del marco de referencia (A_r) se calcula a partir de la base (b) y la altura (h) del marco de referencia. Se calculan trigonómicamente mediante los ángulos del FOV y la dt :

- Cálculo de la base

Primero se determina la hipotenusa (y):

$$y = \frac{dt}{\cos\left(\frac{\text{ángulo horizontal}}{2}\right)}$$

A continuación, se puede calcular la base (b):

$$b = 2 \times \left(y \times \sin\left(\frac{\text{ángulo horizontal}}{2}\right) \right)$$

- Cálculo de la altura

Primero se determina la hipotenusa (y):

$$y = \frac{dt}{\cos\left(\frac{\text{ángulo vertical}}{2}\right)}$$

A continuación, se puede calcular la altura (h):

$$h = 2 \times \left(y \times \sin\left(\frac{\text{ángulo vertical}}{2}\right) \right)$$

3.2.3 Separación de la fruta respecto el plano de referencia

La separación de la fruta respecto el plano de referencia (s_{fruta}) es la distancia entre el plano de referencia y la fruta (Fig. 14).

La distancia fruta (d_{fruta}) es la longitud desde la fruta hasta el punto nodal.

Mediante la d_{fruta} y los ángulos del FOV se puede determinar trigonómicamente el marco distancia fruta. La base del marco distancia fruta (b_{mdf}) y la altura del marco distancia fruta (h_{mdf}) está delimitado por el FOV del objetivo (Fig. 14).

Cuando la fruta esté por delante del marco de referencia, el marco distancia fruta será más pequeño.

Cuando la fruta esté por detrás del marco de referencia, el marco distancia fruta será mayor.

El marco distancia fruta permite calcular en cuantos fotogramas aparecen las frutas más próximas y más alejadas respecto el marco de referencia.

3.2.4 Píxeles marco de la fruta

Los píxeles del marco de la fruta (p_{xf}) son la cantidad de píxeles que contiene el marco de la fruta en el plano distancia fruta donde se encuentra. Se calcula con el número de píxeles de la cámara, el marco de la fruta y el marco distancia fruta.

Como más cerca esté la fruta de la cámara, el marco de la fruta tendrá más píxeles.



3.2.5 Relación entre píxeles marco de la fruta y píxeles totales

La relación sirve para conocer qué porcentaje de píxeles contiene el marco de la fruta respecto el total de píxeles. La relación dependerá del número de píxeles del marco de la fruta y de la cantidad de píxeles de la cámara.

3.2.6 Salto de fotos

El salto de fotografías horizontal (sfh) y vertical (sfv) es la distancia recorrida por la cámara entre fotografías consecutivas en la dirección horizontal y vertical respectivamente.

3.2.7 Número de fotogramas horizontal y vertical

El número de fotogramas horizontal (nfh) y vertical (nfv) es el número de fotografías en las que aparecerá el mismo fruto durante la serie fotográfica.

El nfh sale de la relación entre la base del marco distancia fruta y el sfh.

El nfv sale de la relación entre la altura del marco distancia fruta y el sfv.

Se calcula teniendo en cuenta que la longitud del salto de foto horizontal y vertical sea mayor que la anchura y la altura del marco de la fruta respectivamente. Y que en la primera fotografía la cámara mostrará el fruto de estudio en el margen lateral del marco distancia fruta.

El número total de fotogramas en que aparece el fruto de estudio se obtiene de multiplicar el número de fotogramas horizontales por el número de fotogramas verticales.

3.2.8 Solape

El solape consiste en la superficie superpuesta entre fotografías. Vendrá determinado por la longitud del salto de fotografía. A mayor longitud de salto menor solape, y viceversa, a menor longitud de salto mayor solape.

El solape horizontal (sh) entre dos fotografías consecutivas se calcula restándole a la base del marco distancia fruta la longitud del salto de fotografía horizontal y multiplicándolo por la altura del marco distancia fruta, $sh = (bmdf - sfh) * hmdf$.

El solape vertical (sv) entre dos fotografías consecutivas se calcula restándole a la altura del marco distancia fruta la longitud del salto de fotografía vertical y multiplicándolo por la base del marco distancia fruta, $sv = (hmdf - sfv) * bmdf$.

Si la distancia del sfh es igual que la del sfv, el solape horizontal (Fig. 16a) será superior al solape vertical (Fig. 16b). Porque el marco distancia fruta es rectangular.

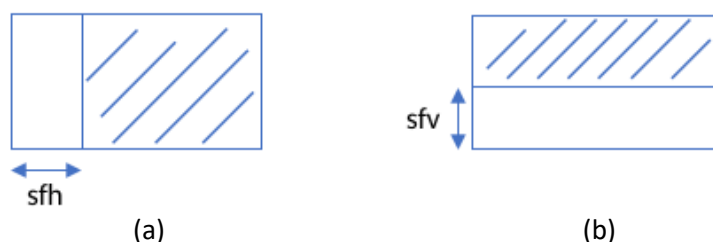


Fig. 16. Representación del solape horizontal (a) y vertical (b) (superficie rayada), siendo la distancia del sfh igual a la del sfv.



El solape horizontal total de fruta (shtf) consiste en calcular el solape horizontal de un fruto teniendo en cuenta el número de fotogramas horizontal. Para calcular el shtf se utiliza la siguiente fórmula, siendo n el número de fotos en que aparece un fruto:

$$\text{shtf} = ((\text{bmdf} - \text{sfh}) + (\text{bmdf} - (\text{sfh} * 2)) + (\text{bmdf} - (\text{sfh} * 3)) + \dots + (\text{bmdf} - (\text{sfh} * n))) * \text{hmdf}$$

De la misma forma se calcula el solape vertical total fruta (svtf):

$$\text{svtf} = ((\text{hmdf} - \text{sfv}) + (\text{hmdf} - (\text{sfv} * 2)) + (\text{hmdf} - (\text{sfv} * 3)) + \dots + (\text{hmdf} - (\text{sfv} * n))) * \text{bmdf}$$

3.2.9 Velocidad en la toma de fotografías horizontales

La velocidad en la toma de fotografías (vf) es el número de fotos que se tomarán por segundo. La vf permite programar el tiempo entre fotografías de la cámara. Si conocemos el salto de foto horizontal necesario y la velocidad del tracto (donde está situada la cámara) se obtiene vf. La expresión de la fórmula es:

$$vf = \frac{vt \times 1000}{(1 \text{ foto} \times sfh) \times 3600}$$



3.3 Generación de la nube de puntos con el Agisoft Photoscan

A continuación, se describe como se forman la nube de puntos poco densa y la nube de puntos densa.

3.3.1 Nube de puntos poco densa (alineación fotográfica)

Una vez descargadas las fotos de estudio al chunk (elemento donde se agrupan las fotos deseadas para ser procesadas) se alinearán. Formando la nube de puntos poco densa. La función de alineación calcula los tie points y encuentra la posición y la orientación de las fotografías tomadas (Agisoft y St Petersburg, 2017). El tie point (punto de enlace) es aquel punto o rasgo característico identificado en dos o más fotografías, utilizado como punto de referencia. Los tie points se calculan a partir de los key points (puntos o rasgos característicos de la escena fotografiada). En la Fig. 17 la esquina marcada es un key point y como en las dos fotografías tomadas se identifica, también se trata de un tie point.

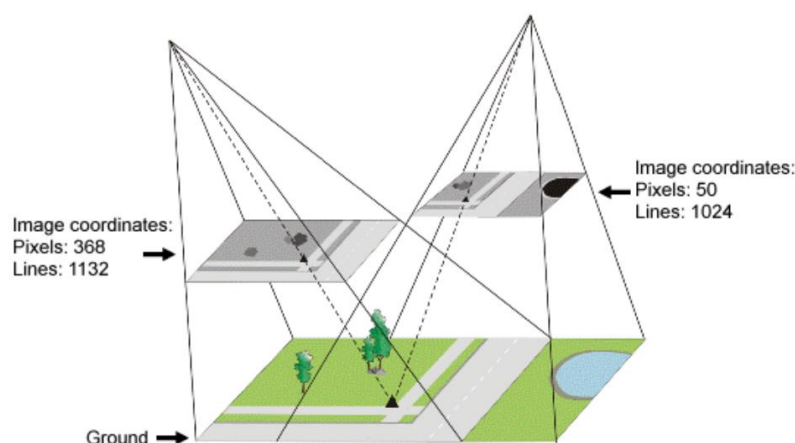


Fig. 17. Representación de la identificación de un tie point a partir de 2 fotografías.

https://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/COMMON/concepts/TiePoint_explain.html

- Exactitud

Durante el proceso de alineación fotográfico, se tiene que escoger el nivel de exactitud a emplear. Niveles de exactitud elevada ayudan a obtener una estimación más exacta de la posición de la cámara. Destacar que una configuración de exactitud muy alta únicamente se recomienda para imágenes nítidas con fines científicos, porque el procesamiento de datos requiere un mayor tiempo (Agisoft y St Petersburg, 2017). En el apartado de resultados y discusión “4.3.1 Exactitud en la alineación fotográfica de la nube poco densa” se evalúan los distintos niveles de exactitud.

- Límite de key points y tie points

En el proceso de alineación fotográfica, se puede determinar el límite de key points y de tie points. En el apartado de resultados y discusión “4.3.2 Límite de key points y tie points en la alineación fotográfica de la nube poco densa” se estudia como afectan estos dos parámetros.

3.3.2 Nube densa de puntos

El programa calcula la nube densa de puntos, mediante la combinación de información en base a la estimación de las posiciones de la cámara. En el apartado de resultados y discusión “4.3.3 Calidad de la nube densa” y “4.3.4 Profundidad de filtraje de la nube densa” se estudian los parámetros de la calidad de la nube densa y de la profundidad de filtraje.



3.4 Parámetros de la cámara y el escenario fijados

A continuación, se describen los parámetros de la cámara y del escenario fijados para que las fotografías sean representativas y se puedan utilizar para comparar las nubes de puntos.

3.4.1 Parámetros de la Cámara

Fotográficos:

- Enfoque ajustado según la dt donde se tome la fotografía.
- ISO de 400.
- Diafragma f/14.
- Tiempo de obturación ≤ 1 s.

Posición:

- Plano de soporte nivelado.
- En reposo.

3.4.2 Escenario

- Fondo

La pared representa el plano imaginario que parte por la mitad la hilera de frutales.

Se ha empapelado la pared y la mesa con hojas de periódico, para facilitar la detección de key points y mejorar la generación de la nube densa de puntos del programa. Se valoró colocar hojas pegadas en la pared, para simular la situación en campo, pero en un escenario interior las hojas no aportarían una mejora para el programa. En la Fig. 18 se muestra la escena fotografiada.

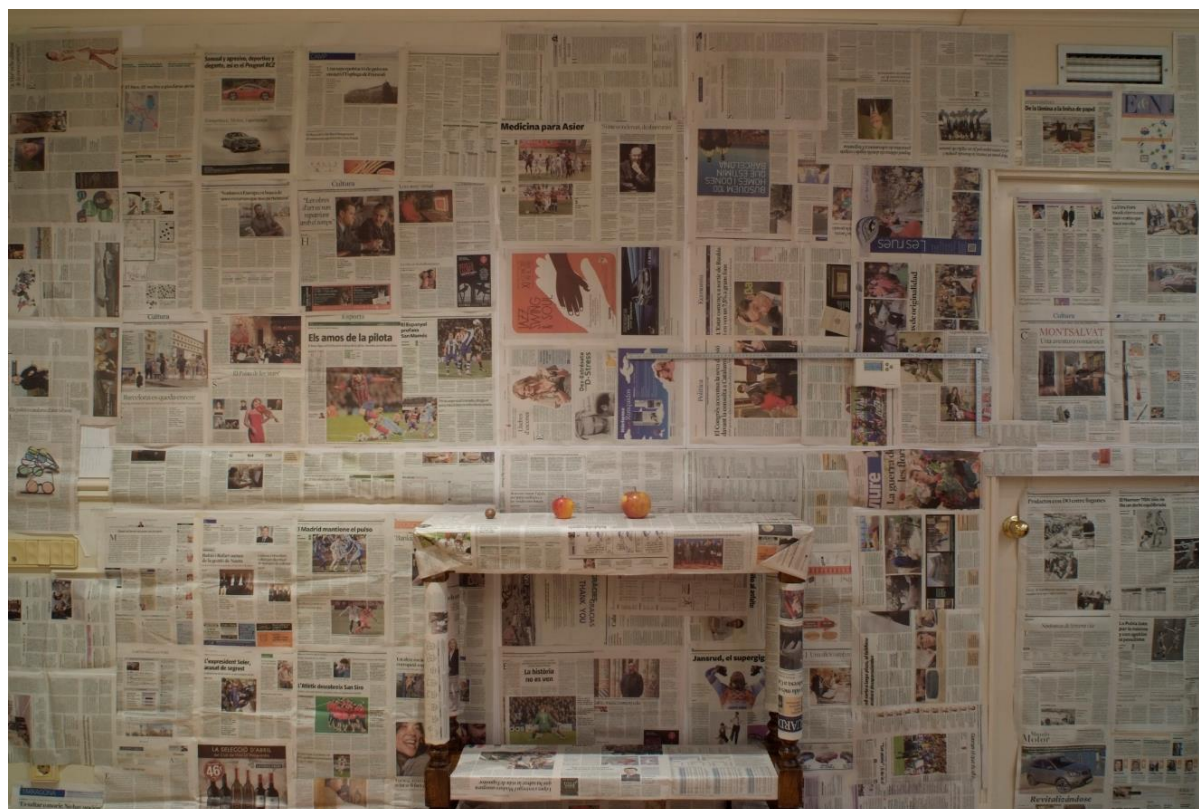


Fig. 18. Representación de la escena fotografiada.



- Frutas

Se han utilizado 3 frutas de distintos tamaños, simulando el crecimiento de la fruta (Tabla 6). Las frutas se han colocado encima de una mesa, separadas 20 cm de la pared.

Tabla 6. Representación de los valores de las 3 frutas de estudio.

Tamaño	Anchura x Altura (cm)	Superficie Marco Fruta (cm ²)
Pequeña	2,8 x 2,8	7,84
Mediana	5,7 x 5,5	31,35
Grande	8 x 7	56,00

3.5 Series fotográficas

Se han realizado un total de 9 series fotográficas resultado de trabajar con tres dt a tres niveles distintos. Realizando un movimiento horizontal de izquierda a derecha. Desde que aparece el fruto en el margen derecho de la cámara hasta que desaparece el fruto en el margen izquierdo de la cámara. Tomando las fotografías con un salto de foto horizontal de 10 cm.

Los frutos están alineados paralelamente al movimiento de la cámara. En la Tabla 7 se muestra la cantidad de fotos totales realizadas en cada dt. En la Tabla 8 se indica el número de fotogramas horizontal final en que aparece un fruto según el tamaño y la dt en cada serie.

Tabla 7. Representación del número total de fotos realizadas.

dt (m)	Núm. Fotos Serie x Núm. Niveles	Total Fotos
1	13 x 3	39
2	24 x 3	72
3	36 x 3	108

Tabla 8. Representación del número de fotogramas horizontal final en que aparece el fruto de estudio por serie y distancia, con un salto de foto horizontal de 10 cm.

dt (m)	Fotos Serie	Tamaño Fruta	Fotogramas que Aparece la Fruta de Estudio por Serie
1	13	Pequeña	9 de 13
		Mediana	9 de 13
		Grande	9 de 13
2	24	Pequeña	21 de 24
		Mediana	20 de 24
		Grande	20 de 24
3	36	Pequeña	32 de 36
		Mediana	32 de 36
		Grande	32 de 36



- dt de estudio

Las tres dt de estudio son 1 m, 2 m y 3 m. Porque son las que se utilizarían en campo, debido al ancho de la calle entre hileras. Las distancias fotográficas más utilizadas serían entre 2 y 3 m. Es posible que en un futuro la fotogrametría se haga más cerca con la ayuda de brazos robóticos.

- Niveles

Los niveles utilizados han sido el bajo, medio y alto:

En el nivel bajo, la cámara está a la misma altura que el fruto, por lo que las frutas aparecen a la mitad de la altura del marco de referencia (Fig. 19a, 19d y 19g).

En el nivel medio, la cámara está unos cm por encima de la altura de las frutas, por lo que las frutas aparecen un poco más abajo en el marco de referencia (Fig. 19b, 19e y 19h).

En el nivel alto, la cámara está unos cm más por encima de la altura de las frutas, por lo que las frutas aparecen más abajo en el marco de referencia (Fig. 19c, 19f y 19i).

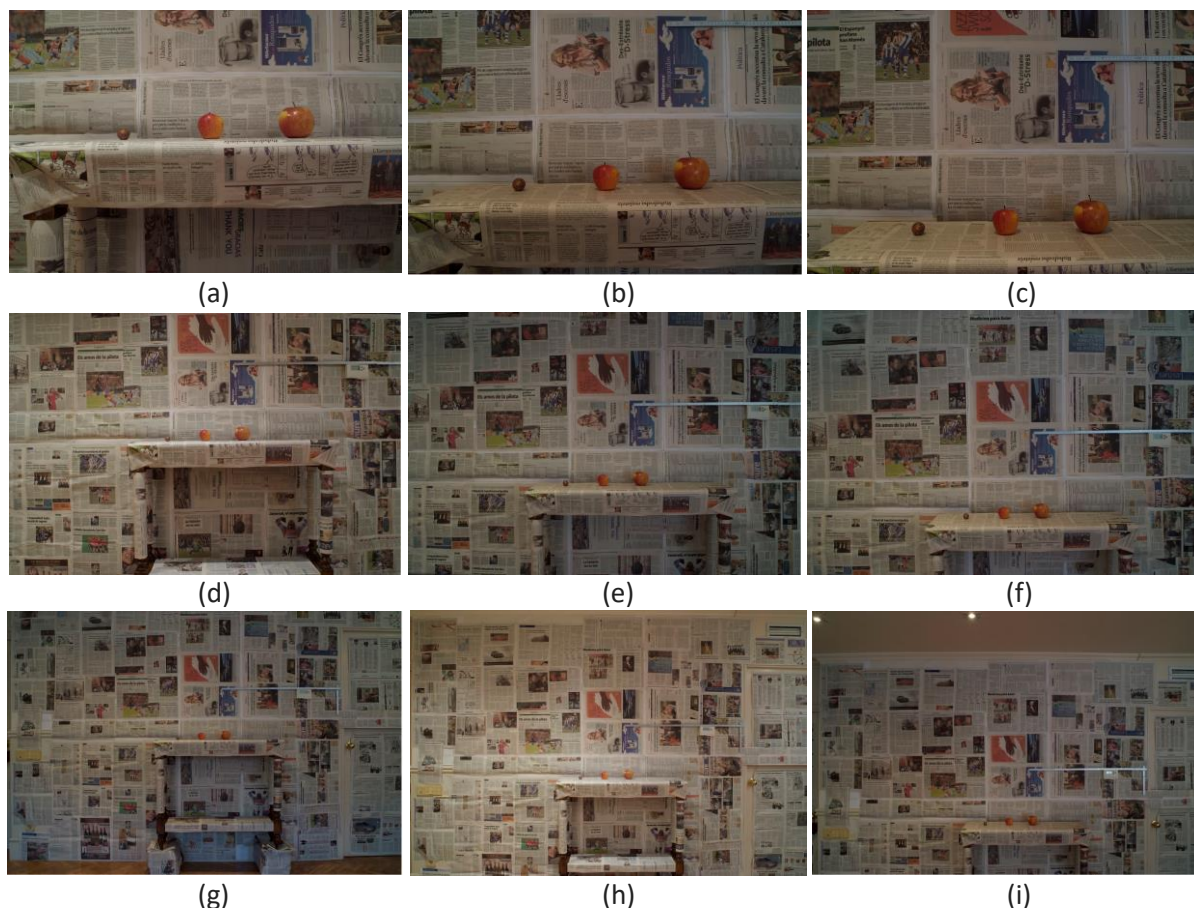


Fig. 19. Representación del nivel bajo (a,d,g), medio (b,e,h) y alto (c,f,i), a una dt de 1 m (a,b,c), 2 m (d,e,f) y 3 m (g,h,i).

En el estudio de métodos horizontales, comentados a continuación, se ha escogido utilizar el nivel medio. Porque con el nivel bajo se podría llegar a tener inconvenientes con la visualización de los frutos por la mesa de apoyo, y con el método de nivel alto los frutos se encuentran en la zona inferior de la fotografía.



Para poder comparar el nivel medio a 1 m, 2 m y 3 m, se ha realizado un incremento del salto de foto vertical proporcional al marco de cada distancia (Tabla 9). De esta forma la fruta en la serie de nivel medio se encuentra en las 3 distancias a la misma altura proporcional del marco

Tabla 9. Representación del salto de foto vertical realizado a cada dt.

dt (m)	Salto de foto Vertical (cm)
1	10,0
2	20,7
3	31,2

En el estudio de métodos combinados se han utilizado los 3 niveles.



3.6 Métodos

Se ha seleccionado y agrupado las fotografías, realizadas en las series fotográficas, con 3 métodos horizontales y 2 combinados. Con la finalidad de estudiar el método que permita al algoritmo RANSAC detectar la fruta con el menor número de fotografías.

3.6.1 Métodos horizontales

Se han utilizado 3 métodos aprovechando el movimiento horizontal de izquierda a derecha para generar las nubes de puntos de las series fotográficas con el programa Agisoft Photoscan.

- Lineal: Consiste en incluir en todos los chunks la primera fotografía de la serie fotográfica en que aparece la fruta. A medida que se van realizando chunks se va aumentando el salto de foto horizontal entre las fotografías de la serie fotográfica. De esta forma, el primer chunk tiene un salto de foto horizontal entre las fotografías de 10 cm. El siguiente chunk tiene un salto de foto horizontal entre las fotografías de 20 cm y así sucesivamente.
- Estereoscópico: Consiste en realizar un chunk con solo dos fotografías centrales. A medida que se van realizando chunks se va aumentando el salto de foto horizontal entre las dos fotos horizontales centrales. De esta forma, el primer chunk contiene las dos fotos centrales de la serie fotográfica con un salto de foto horizontal de 10 cm. El siguiente chunk contiene dos fotos horizontales centrales, pero en este caso con un salto de foto horizontal de 20 cm, el salto de foto horizontal del tercer chunk sería de 40 cm.
- Central: Consiste en poner en todos los chunks la fotografía central de la fruta de estudio de la serie fotográfica, juntamente con una foto contigua a la central por banda. A medida que se van realizando chunks se va aumentando 10 cm el salto de foto entre la foto central y la foto contigua. Por lo tanto, en el primer chunk se utilizan las tres fotos centrales de la serie fotográfica con un salto de foto de 10 cm, en el segundo chunk sigue utilizándose la foto central y una foto contigua a la central por banda con un salto de foto de 20 cm y así sucesivamente. Éste método es parecido al método central. Pero en vez de utilizarse solamente dos fotografías, se utiliza una tercera que estará siempre en el centro, justo delante del fruto.

3.6.2 Métodos combinados

- Vertical: Consiste en poner la foto central de la fruta de estudio de la serie fotográfica de los niveles bajo, medio y alto. Obteniendo chunks de 3 fotografías verticales tomadas en frente del fruto de estudio.
- Cruz: Consiste en añadir a las 3 fotos centrales con un salto de foto horizontal de 10cm del nivel medio la foto central de los niveles bajo y alto del mismo fruto de estudio. Obteniendo chunks de 5 fotografías en cruz combinando fotografías horizontales y verticales.



3.7 Escalado y comprobación

3.7.1 Escalado

Para escalar la nube de puntos del Agisoft Photoscan se han definido dos distancias conocidas, una horizontal y otra vertical. Primero se marcan sobre una foto perteneciente al chunk 2 puntos para definir la distancia horizontal y 2 puntos para definir la distancia vertical (Fig. 20). A continuación, se escribe la distancia entre puntos. El programa realiza el escalado y define el error (Fig. 21). En la nube de puntos se representan las 4 marcas y las dos distancias (Fig. 22).

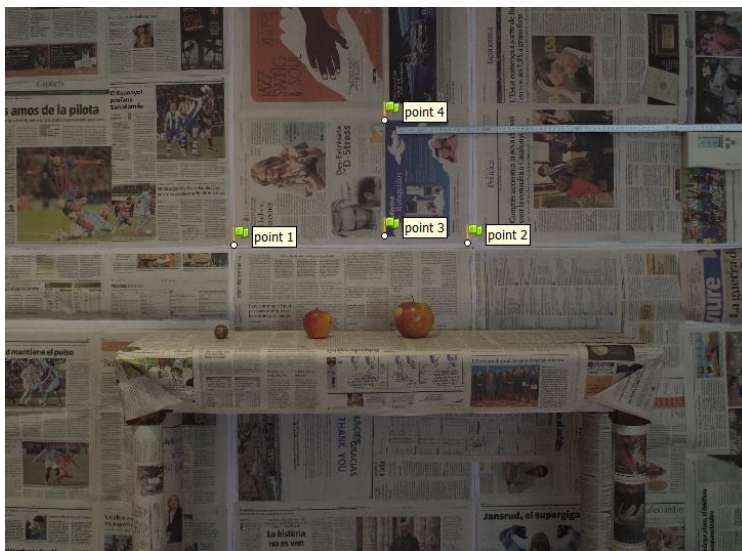


Fig. 20. Representación de las marcas en una fotografía del chunk.

Scale Bars		Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/>	point 1_point 2	0.517000	0.001000	-0.000181
<input checked="" type="checkbox"/>	point 3_point 4	0.256000	0.001000	0.000364
Total Error				
Control scale bars				0.000288
Check scale bars				

Fig. 21. Representación de la distancia definida entre puntos y el error de escala.



Fig. 22. Representación de los puntos y de las distancias en la nube densa de puntos.

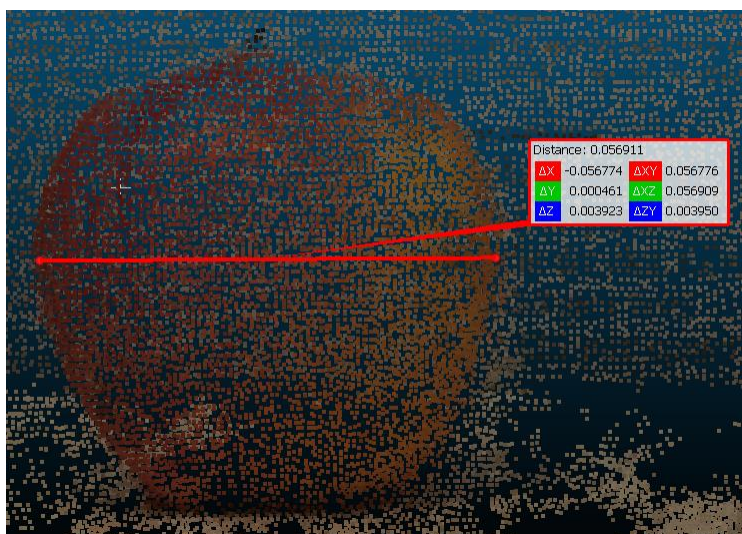


- Exportación nube de puntos

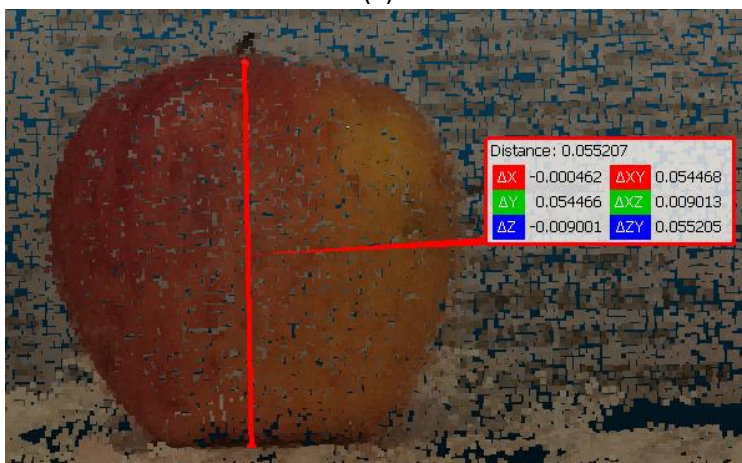
El programa Agisoft Photoscan permite exportar la nube de puntos a un fichero de texto (.txt) en formato XYZ Point Cloud. Este documento contiene las coordenadas x, y, z de cada punto de la nube de puntos.

3.7.2 Comprobación escalado

Para poder comprobar el escalado se utiliza el software CloudCompare. Se importa el fichero de texto (.txt) en formato XYZ Point Cloud. Y mediante la herramienta Point Picking se mide la distancia entre dos puntos. En la Fig. 23a se muestra la distancia de la anchura y en la Fig. 23b la distancia de la altura de la fruta mediana (5,7 x 5,5 cm) calculadas con el CloudCompare.



(a)



(b)

Fig. 23. Representación de la distancia entre puntos de la anchura (a) y la altura (b) de la fruta mediana.



3.8 Detección y medición de frutas en CloudCompare

Se ha utilizado la herramienta Automatic RANSAC Shape Detection (RSD) para la detección y medición del radio de las manzanas. En la Fig. 24a se muestra la nube densa de puntos de la escena fotografiada y en la Fig. 24b la detección y caracterización de las frutas con el RSD.



(a)



(b)

Fig. 24. Representación de una nube densa de puntos (a) y la detección y caracterización de frutas en la misma nube de puntos con el RSD (b).

Los parámetros avanzados reflejados en la Fig. 25 son los que se han utilizado en la herramienta RSD para una mejor detección y medición de las frutas. En experiencias previas se han utilizado y funcionaban correctamente. En el apartado de resultados y discusión “4.5 Estudio del número de puntos mínimos en RSD” se estudia el parámetro número de puntos mínimos por esfera.

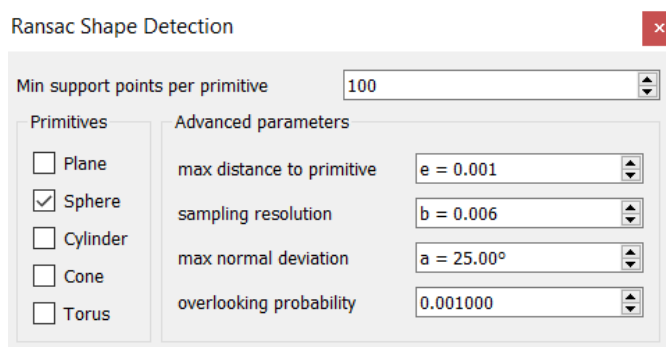


Fig. 25. Representación de los parámetros fijados en la herramienta RSD.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se desarrolla el parámetro del FOV. Se describe la interacción de los parámetros fotográficos mediante un ejemplo práctico de la hoja de cálculo. Se exponen los estudios de configuración y comportamiento del Agisoft Photoscan. Se muestra el estudio del parámetro número de puntos mínimos del RSD y la forma de la manzana. Finalmente, se presentan y discuten los resultados de detección y caracterización geométrica de la fruta.

4.1 Resultados del estudio del FOV

A continuación, se exponen los pasos a seguir para conocer el FOV del dispositivo fotográfico utilizado.

4.1.1 Especificaciones técnicas

Primero se identifica en las especificaciones del objetivo (Fig. 26), la distancia focal y el ángulo de visión. El objetivo utilizado es un gran angular de distancia focal fija de 20 mm. El ángulo de visión dado en las especificaciones es el ángulo diagonal del FOV.

Distancia focal	20 mm
Diafragma máximo	f/2.8
Diafragma mínimo	f/22
Construcción del objetivo	12 elementos en 9 grupos
Ángulo de visión	94° (70° con el formato DX de Nikon)
Distancia de enfoque mínima	0,25 m

Fig. 26. Representación de las especificaciones técnicas del objetivo Nikon, modelo AF NIKKOR 20mm f/2.8. https://www.nikon.es/es_ES/product/nikkor-lenses/auto-focus-lenses/fx/single-focal-length/af-nikkor-20mm-f-2-8d#tech_specs

El FOV del objetivo depende del tamaño del sensor de la cámara. En las especificaciones del objetivo se muestran dos ángulos. El ángulo diagonal del objetivo es de 94 ° cuando la cámara dispone de un sensor Full Frame (36,0 x 24,0 mm). Mientras que cuando el dispositivo tenga un sensor Nikon DX (24,0 x 16,0 mm) el ángulo será de 70 °.

La cámara utilizada en el TFG tiene el sensor Super CCD SR Pro (23,0 x 15,5 mm), por lo tanto, el ángulo diagonal será ligeramente inferior de 70 °.



4.1.2 Cálculo FOV teórico

En caso de no conocer el ángulo diagonal que conforma el objetivo con el dispositivo fotográfico se puede calcular. Para obtener el valor solamente hace falta saber las dimensiones del sensor y la distancia focal del objetivo. En la hoja de cálculo del Excel el FOV teórico se calcula automáticamente al introducir las dimensiones del sensor y la distancia focal del objetivo.

- Ángulo diagonal

Primero se determina la longitud de la mitad diagonal del sensor (Fig. 27).

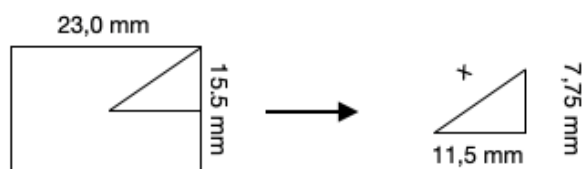


Fig. 27. Representación del tamaño del sensor de la cámara, y de la obtención de la mitad de la diagonal.

Mediante el teorema de Pitágoras, se puede obtener la hipotenusa del triángulo recto, con las dimensiones de la mitad diagonal del sensor:

$$x^2 = 11,5^2 + 7,75^2$$

El valor de la hipotenusa o x, es de 13,87 mm.

Conociendo la mitad de la diagonal del sensor y la distancia focal del objetivo, se puede determinar la mitad del ángulo diagonal (Fig. 28). Que sale del punto nodal hasta el plano focal.

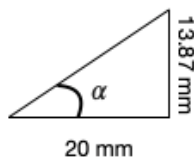


Fig. 28. Representación de la mitad del ángulo diagonal de la cámara.

Mediante el arco tangente de α , se puede obtener el valor de la mitad del ángulo diagonal:

$$\arctg(\alpha) = \frac{13,87}{20}$$

El valor de α , es de $34,74^\circ$. Por lo tanto, el valor del ángulo diagonal es $34,74^\circ \times 2 = 69,48^\circ$. El valor del FOV teórico diagonal ($69,48^\circ$) es muy cercano al valor del FOV diagonal (70°) de las especificaciones técnicas, tal como se había comentado.

- Ángulo horizontal y vertical

A continuación, se puede calcular el ángulo horizontal y vertical. Conociendo el FOV, se podrá calcular el marco fotografiado a cualquier distancia de trabajo.

Los pasos a seguir para calcular los ángulos horizontal y vertical, son los mismo que los utilizados para la obtención del ángulo diagonal.

Para calcular la mitad del ángulo horizontal, se usa el arco tangente de α :



$$\arctg(\alpha) = \frac{11,5}{20}$$

El valor de α , es de $29,90^\circ$. Por lo tanto, el valor del ángulo horizontal es $29,90^\circ \times 2 = 59,80^\circ$.

Para calcular la mitad del ángulo vertical, se usa el arco tangente de α :

$$\arctg(\alpha) = \frac{7,75}{20}$$

El valor de α , es de $21,18^\circ$. Por lo tanto, el valor del ángulo horizontal es $21,18^\circ \times 2 = 42,36^\circ$.

- Valores FOV teórico

En resumen, el FOV de la cámara Fujifilm utilizada con el objetivo Nikon, modelo AF NIKKOR 20 mm se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Representación del FOV teórico obtenido mediante la dimensión del sensor y de la distancia focal del objetivo.

Ángulo Diagonal	Ángulo Horizontal	Ángulo Vertical
69,48 °	59,80 °	42,36 °

4.1.3 Comprobación del FOV teórico

Una vez obtenido el FOV teórico, calculado mediante el tamaño del sensor y la distancia focal. Se ha querido comprobar, mediante la toma fotográfica, si coincide el FOV teórico calculado con el FOV obtenido en la escena fotografiada.

Para comprobarlo se han generado 3 escenas a 1 m, 2 m y 3 m de distancia de trabajo, que han permitido conocer las dimensiones del marco de referencia de la pared fotografiada. Mediante las dimensiones del marco y la distancia de trabajo, se ha podido calcular y conocer el FOV empírico o real. En el apartado del anexo “7.2 Trabajo realizado para la obtención del FOV empírico en las distintas escenas” se explica detalladamente el trabajo realizado para la obtención del FOV empírico en las distintas escenas.

Para la determinación del FOV empírico es importante colocar la cámara a la distancia correcta y nivelarla. Se utilizará la marca del plano focal de la cámara para conocer la distancia de trabajo y la distancia del plano focal (Fig. 29).



Fig. 29. Representación de la marca del plano focal de nuestra cámara.



En la Tabla 11, se muestran los resultados obtenidos del FOV empírico. Se observa que el FOV obtenido a 1, 2 y 3 m de dt varía. Concretamente, va aumentando con la distancia.

Tabla 11. Representación de la comparación del FOV teórico obtenido mediante la dimensión del sensor y de la distancia focal del objetivo y el FOV empírico a una distancia de trabajo de 1 m, 2 m y 3 m con el enfoque respectivo y a 3 m con el enfoque de largas distancias.

FOV	Ángulo Diagonal	Ángulo Horizontal	Ángulo Vertical
FOV Teórico	69,48 °	59,80 °	42,36 °
FOV Empírico (1 m)	66,64 °	57,62 °	39,60 °
FOV Empírico (2 m)	68,18 °	58,93 °	40,86 °
FOV Empírico (3 m)	68,50 °	59,22 °	41,11 °
FOV Empírico (3 m) enfoque ∞	68,74 °	59,44 °	41,28 °

Este fenómeno, se produce debido a cambiar el enfoque con el objetivo. Aunque se disponga de un objetivo fijo, a la hora de enfocar la fotografía se modifica ligeramente el FOV.

El FOV máximo se obtiene con el objetivo enfocando a larga distancia, mostrado en la tabla. Por lo tanto, al aumentar la distancia de enfoque aumenta el FOV.

Los valores del FOV indicado en las especificaciones técnicas del objetivo y del FOV teórico se generan con el objetivo enfocando a larga distancia. Representado en el objetivo con el símbolo infinito.

En la Tabla 11 también se muestra que el FOV teórico es muy parecido al FOV empírico enfocando a larga distancia. No suponen un inconveniente para el estudio del trabajo.

Por lo tanto, el técnico que utilice la herramienta del Excel puede utilizar el FOV teórico para el cálculo de los parámetros fotográficos.

Como se ha realizado el esfuerzo de obtener el FOV empírico, en el TFG se ha utilizado para calcular el número de fotogramas de las frutas de estudio en las series fotográficas, mostrada en la Tabla 8 del apartado “3.5 Series fotográficas”.

4.1.4 Distancia focal efectiva

El ángulo capturado no solamente depende del objetivo utilizado, sino que también dependerá de las dimensiones del sensor de la cámara.

La distancia focal efectiva (dfe) es un concepto utilizado para conocer el objetivo que se requeriría en una cámara Full Frame (36,0 x 24,0 mm) para tener el mismo FOV que nuestra cámara con sensor de (23,0 x 15,5 mm) y objetivo de 20 mm.

Si nuestra cámara tuviera un sensor Full Frame, la distancia focal efectiva sería de 20 mm. Pero nuestro sensor tiene unas dimensiones menores. Por lo que la distancia focal efectiva será distinta a 20 mm.

Anteriormente, se ha comentado que el objetivo utilizado es fijo de 20 mm. Por lo que la distancia focal de la cámara utilizada es de 20 mm (Verhoeven, 2007).



- Factor de multiplicación

Para calcular la distancia focal efectiva, se utiliza un factor de multiplicación (fm). Relacionando la base del sensor Full Frame con la base del sensor de la cámara utilizada.

$$fm = \frac{\text{base sensor Full Frame}}{\text{base sensor utilizado}}$$

$$fm = \frac{36,0 \text{ mm}}{23,0 \text{ mm}} = 1,56$$

El factor de multiplicación se aplica a la distancia focal del objetivo, obteniendo la distancia focal efectiva.

$$dfe = 20 \text{ mm} \times 1,56 = 31,3 \text{ mm}$$

Por lo tanto, con una distancia focal de 31,3 mm en un sensor Full Frame se capturará prácticamente la misma imagen que con la cámara y el objetivo utilizado en este trabajo. Demostrado en el apartado del anexo “7.3 Demostración de la relación del factor de multiplicación”.

El fm y la dfe se calculan automáticamente en la hoja de cálculo.



4.2 Ejemplo práctico hoja excel “Cálculo de los Parámetros Fotográficos para la Detección de Fruta”

En este punto se explica el contenido de la hoja de cálculo y la interacción de los parámetros fotográficos mediante un ejemplo.

El archivo de la hoja Excel de cálculo contiene tres pestañas además de la portada. El usuario puede elegir calcular los parámetros fotográficos utilizando los valores del FOV teórico o bien del FOV empírico.

A continuación, se describen las tres pestañas:

En la pestaña “FOV Teórico” se ha utilizado el FOV teórico para el cálculo de los parámetros fotográficos. El FOV teórico es calculado con los valores de entrada distancia focal del objetivo y las dimensiones del sensor. La base y la altura de referencia es calculada con el FOV teórico.

En la pestaña “FOV Usuario” únicamente se muestran los datos de entrada y salida de interés. Se utiliza el FOV teórico. Está pensado para utilizarse en campo.

En la pestaña “FOV Empírico” se ha utilizado el FOV empírico para el cálculo de los parámetros fotográficos. El usuario tiene que introducir la base y la altura empírica del marco de referencia según la dt de interés para obtener el FOV empírico.

Para el cálculo de los parámetros fotográficos de las series fotográficas utilizadas en este trabajo se ha utilizado la pestaña “FOV Empírico”. Porque previamente se ha determinado la base y la altura empírica del marco de referencia a 1 m, 2 m y 3 m. Pero se recomienda que el usuario utilice las pestañas “FOV Teórico” o “FOV Usuario”. Porque varía muy poco el valor del FOV teórico respecto el FOV empírico y el usuario no tendrá que calcular manualmente las base y la altura del marco de referencia.

En la hoja de cálculo el usuario tiene que introducir los datos de las especificaciones de la cámara y del objetivo utilizado y los datos escogidos para la realización de la serie fotográfica, mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12. Representación de los datos de entrada de la hoja de cálculo.

Datos Especificaciones Cámara y Objetivo	Datos Utilizados en la Serie Fotográfica
Píxeles Horizontales	Anchura Marco Fruta
Píxeles Verticales	Altura Marco Fruta
Distancia Focal Objetivo	Distancia Trabajo
Anchura Sensor Cámara	Separación de la Fruta respecto Plano de Referencia
Altura Sensor Cámara	Salto de Foto Horizontal
	Salto de Foto Vertical
	Velocidad del Tractor
	Longitud Hilera Frutales Fotografiada
	Altura Hilera Frutales Fotografiada

A continuación, se expone un ejemplo práctico de la hoja de cálculo utilizando la pestaña “FOV Teórico”. El usuario primero entra todos los datos de entrada conocidos. Los datos de las especificaciones de la cámara y objetivo hacen referencia a los utilizados en el TFG, representados en celas naranjas. Y los datos utilizados en la serie fotográfica son extrapolables en campo, representados en celas verdes. Y automáticamente la hoja de cálculo genera todos los resultados.



Primero se introducen las dimensiones del sensor y la distancia focal del objetivo y se obtienen los valores del FOV teórico (Fig. 30).

Objetivo		
df	Distancia Focal Objetivo (mm)	20
Dimensiones Sensor		
as	Anchura Sensor Cámara (mm)	23,0
hs	Altura Sensor Cámara (mm)	15,5
FOV Teórico		
α_h	Ángulo del Objetivo Horizontal (°)	59,80
α_v	Ángulo del Objetivo Vertical (°)	42,36
α_d	Ángulo del Objetivo Diagonal (°)	69,47
fm	Factor de Multiplicación	1,57
dfe	Distancia focal Efectiva (mm)	31,30

Fig. 30. Representación de las entradas objetivo y dimensiones sensor y de las salidas FOV Teórico.

A continuación, se introduce la distancia de trabajo desde donde se quiera realizar la serie fotográfica. El programa calcula la distancia del plano focal, simplemente sumando a la distancia de trabajo la distancia focal del objetivo. También se calcula trigonómicamente la base y la altura del marco de referencia mediante la dt y el FOV teórico calculado. Representado en la Fig. 31.

Distancias		
dt	Distancia Trabajo (Plano de Referencia - Punto Nodal) (m)	2,00
dpf	Distancia Plano Focal (Plano de Referencia - Plano Focal) (m)	2,020
Base y Altura del Marco de Referencia		
HORIZONTAL		
y	Hipotenusa (m)	2,31
b/2	Mitad Base (m)	1,15
b	Base (m)	2,30
VERTICAL		
y	Hipotenusa (m)	2,14
h/2	Mitad Altura (m)	0,78
h	Altura (m)	1,55

Fig. 31. Representación de las entradas distancia de trabajo y de las salidas base y altura del Marco de Referencia.



Seguidamente indicando la dimensión de la fruta de estudio se puede calcular la superficie del marco de la fruta. Y con los valores previamente calculados de la base y la altura del marco de referencia se determina la superficie del marco de referencia. Representado en la Fig. 32.

	Dimensiones Fruta y Sup. de Marco de Referencia	
af	Anchura Marco Fruta (cm)	8,0
hf	Altura Marco Fruta (cm)	7,0
Af	Sup. Marco Fruta (cm ²)	56,0
Ar	Sup. Marco Referencia (m ²)	3,57

Fig. 32. Representación de las entradas dimensión marco fruta de estudio y de las salidas superficie marco fruta y referencia.

A continuación, se indica la separación del fruto de estudio respecto el plano de referencia. Y la hoja de cálculo determina la distancia fruta restando a la distancia de trabajo la separación de la fruta respecto el plano de referencia. Con este valor y los valores del FOV teórico se puede calcular trigonométricamente la base y la altura del marco distancia fruta. En la Fig. 33, se puede observar como la base y la altura del marco distancia fruta (2,07 x 1,40) es menor a la base y la altura del marco de referencia (2,30 x 1,50). Porque el fruto se encuentra 20 cm delante del plano de referencia. Cuando la fruta se encuentre detrás del plano de referencia el usuario tiene que poner el valor de la distancia de separación con el signo negativo. En este caso la base y la altura del marco distancia fruta será mayor a la base y la altura del marco referencia. En campo, se escogerá una separación media de las frutas respecto el plano de referencia.

	Separación Fruta	
sfruta	Separación de la Fruta respecto Plano de Referencia (m)	0,20
dfruta	Distancia Fruta (Fruta - Punto Nodal) (m)	1,80
bmdf	Base del Marco Distancia Fruta (m)	2,07
hmdf	Altura del Marco Distancia Fruta (m)	1,40

Fig. 33. Representación de la entrada separación de la fruta respecto plano de referencia y de la salida de la base y la altura del marco distancia fruta.

Posteriormente, se introducen los píxeles horizontales y verticales de la cámara. Con estos valores se pueden calcular los píxeles totales. Y se puede conocer la cantidad de píxeles que tiene el marco fruta teniendo en cuenta la separación de la fruta respecto el plano de referencia. Cuando la fruta sea grande, el fruto esté cerca de la cámara y la resolución de la cámara sea alta, el valor de pxf será alto. Mientras que cuando la fruta sea pequeña, esté lejos y la resolución de la cámara sea baja, el valor pxf será bajo. Finalmente se ha obtenido el resultado en % de la relación pxf/pxt. Representado en la Fig. 34.



	Píxeles	
pxh	Píxeles Horizontales (px)	4256
pxv	Píxeles Verticales (px)	2848
pxt	Píxeles Totales(px)	12121088
pxaf	Píxeles Anchura Marco Fruta (px)	164,5
pxhf	Píxeles Altura Marco Fruta (px)	142,9
pxf	Píxeles Marco Fruta (px)	23506,3
	Relación pxf/pxt	0,19%

Fig. 34. Representación de la entrada píxeles horizontales y verticales y de la salida píxeles totales, píxeles anchura y altura marco fruta, píxeles marco fruta y relación pxf/pxt.

A continuación, añadiendo el salto de foto deseado (0,10 m horizontal y 0,6 m vertical) se puede conocer el solape y el número de fotogramas de la fruta, de una manzana grande, a una dt de 2 m y a una separación del plano de referencia de 20 cm, representado en la Fig. 35. A mayor salto de foto menor solape y número de fotogramas. Si fijamos el salto de foto, a mayor dt mayor solape y número de fotogramas. La separación de la fruta respecto el plano de referencia también afecta, como más se acerque la fruta a la cámara menor solape y menor número de fotogramas.

Como el valor del nfh y nvf puede dar en decimales, se calcula si la fruta aparecerá completa en el último fotograma de la serie fotográfica del fruto de estudio. En este ejemplo, el último fotograma horizontal mide 7 cm y nuestra manzana mide 8 cm de anchura, causando que la fruta aparezca cortada. Por lo tanto, no se contará el último fotograma, en vez de 21 nfhf, habrá 20 nfhf, representado en la Fig. 35.



Solape		
HORIZONTAL		
sfh	Salto de Foto Horizontal (m)	0,10
sh	Solape Horizontal (m ²)	2,75
shtf	Solape Horizontal Total Fruta (m ²)	28,36
VERTICAL		
sfv	Salto de Foto Vertical (m)	0,60
sv	Solape Vertical (m ²)	1,65
svtf	Solape Vertical Total Fruta (m ²)	2,05
Número Fotogramas		
HORIZONTAL		
nfh	Número de Fotograma Horizontal	20,70
nfhrr	Número de Fotograma Horizontal Redondeado	20,00
dufh	Centímetros del Último Fotograma en 1a Base (cm)	7,00
nfhf	Número de Fotograma Horizontal Final	20
VERTICAL		
nfvr	Número de Fotograma Vertical	2,33
nfvr	Número de Fotograma Vertical Redondeado	2,00
dufv	Centímetros del Último Fotograma en 1a Altura (cm)	19,50
nfvr	Número de Fotograma Vertical Final	3
TOTAL		
nft	Número de Fotograma Total	60

Fig. 35. Representación de la entrada salto de foto horizontal y vertical y de la salida de valores de solape y de número de fotogramas.

Conociendo el salto de foto horizontal y la velocidad del tractor, se puede calcular la velocidad en la toma de fotografías horizontales. En este ejemplo, con un salto de fotografía de 10 cm y una velocidad del tractor de 5 km/h, se generarán aproximadamente 14 fotografías/s, representado en la Fig. 36. A mayor velocidad del tractor y menor salto de foto horizontal, mayor será la velocidad necesaria en la toma de fotos horizontales, y por lo tanto el tiempo entre fotografías tendrá que ser menor. La capacidad para capturar fotografías de nuestra cámara es de 3 fotografías/s, consecuentemente no podría conseguir una frecuencia de fotografía de 14 fotografías/s. Si se pusiera nuestra cámara en un tractor en campo, se tendría que reducir la velocidad del tractor o bien aumentar el salto de foto horizontal.

Velocidad Toma Fotografías		
vt	Velocidad del Tractor (km/h)	5,0
vf	Velocidad en la Toma de Fotos Horizontales (fotografías/s)	13,9

Fig. 36. Representación de la entrada velocidad del tractor y de la salida velocidad en la toma de fotografías horizontales.



Finalmente se puede calcular la cantidad de fotografías que se harán en una hilera de frutales, conociendo sus dimensiones y el salto de fotografía (Fig. 37).

Fotografías por Hilera de Frutales		
lh	Longitud Hilera Frutales Fotografiada (m)	100
hh	Altura Hilera Frutales Fotografiada (m)	3
tfh	Total Fotografías por Hilera	5000

Fig. 37. Representación de la entrada longitud y altura hilera frutales fotografiada y de la salida total fotografías por hilera.



4.3 Resultados del estudio de configuración del Agisoft Photoscan

En este apartado se muestran los estudios realizados para configurar correctamente los parámetros de formación de la nube de puntos del programa Agisoft Photoscan.

4.3.1 Exactitud en la alineación fotográfica de la nube poco densa

A continuación, se procede a valorar el parámetro “Exactitud en la alineación fotográfica” para la generación de la nube poco densa.

Se han comparado los chunks según la calidad de exactitud en la nube poco densa. Se han realizado 15 chunks (5 con exactitud baja, 5 media y 5 alta), variando el número de fotos por chunk. Se observa que en baja exactitud se generan menos tie points en la nube poco densa, mientras que en exactitud media y alta el número de tie points generados es muy similar.

A la hora de realizar la nube densa de puntos, el número de puntos es muy parecido indistintamente del tipo de exactitud escogida. Por lo que la visualización de la manzana es muy similar en las 3 calidades, representado en la Fig. 38. Pero se recomienda escoger la exactitud alta, para determinar mejor la posición de la cámara i facilitar la formación de la nube densa de puntos. Requiriendo solamente un poco más de tiempo en el proceso de alineación fotográfica y de formación de la nube densa de puntos (Tabla 13).

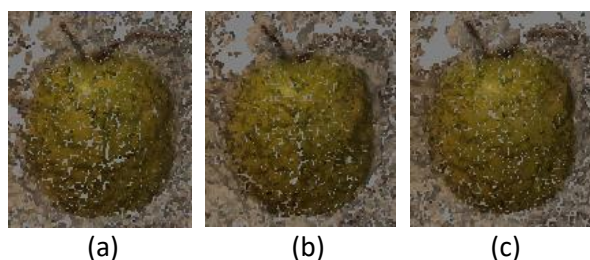


Fig. 38. Representación de la nube de puntos de 3 chunks (de 6 fotografías por chunk), con baja (a), media (b) y alta exactitud (c).

Tabla 13. Representación del tiempo (calculado con el portátil 1) de alineación y de formación de la nube densa de puntos variando la exactitud de alineación en chunks con distintos núm. de fotografías. Se ha fijado la calidad media y la profundidad de filtraje moderate.

Núm. fotografías por chunk	Exactitud		
	Baja (s)	Media (s)	Alta (s)
2 fotografías/chunk	2 y 8 = 10	5 y 10 = 15	10 y 8 = 18
3 fotografías/chunk	5 y 23 = 28	8 y 20 = 28	17 y 22 = 39
4 fotografías/chunk	7 y 31 = 38	12 y 36 = 48	18 y 41 = 59
5 fotografías/chunk	9 y 56 = 65	13 y 49 = 62	23 y 57 = 80
6 fotografías/chunk	10 y 65 = 75	16 y 59 = 75	29 y 75 = 104



4.3.2 Límite de key points y tie points en la alineación fotográfica de la nube poco densa

Los tie points dependen de los key points. Si se pone un límite de key points muy bajo (500 p. ej.), se van a calcular muy pocos tie points, indistintamente del valor límite de tie points. Probablemente no se podrá procesar la nube densa de puntos.

Por otro lado, no sirve de nada poner un límite de key points muy alto (100.000 p. ej.) y un límite de tie points bajo (500 p. ej.). Ya que solo se identificarán 500 tie points aproximadamente.

Mientras que si se pone un límite de key points muy alto (100.000 p. ej.) y un límite de tie points alto (40.000 p. ej.) se procesarán muchos tie points.

El programa recomienda un límite de 4.000 tie points. Ya que permite optimizar el desarrollo de la función de alineación fotográfica. En el siguiente ejemplo se estudia la limitación de los tie points.

Se han realizado 3 chunks, con las mismas fotografías y con un límite de 40.000 key points, pero variando el límite de tie points según el chunk. Los valores límite de tie points han sido de 20.000 en el primer chunk, de 4.000 en el segundo chunk y de 500 en el tercer chunk.

A la hora de calcular la alineación fotográfica, en el primer chunk se han detectado 16.257 tie points, en el segundo chunk 4.447 tie points y en el tercer chunk 479 tie points. Por lo tanto, se comprueba que el aumento del límite de tie points incrementa su detección. También se incrementa el tiempo del proceso de alineación fotográfica en 32 s, 26 s y 19 s respectivamente. Finalmente, al procesar la nube densa de puntos, se obtienen 785.522 puntos, 787.858 puntos y 759.082 puntos respectivamente y la nube de puntos formada en los tres chunks es muy parecida. En la Tabla 14 se muestran los valores comentados.

Se recomienda utilizar un límite de **40.000 key points y 4.000 tie points**.

Tabla 14. Representación de los valores (calculado con el portátil 1) de los chunks variando el límite de tie points.

Chunk	Límite de Key Points	Límite de Tie Points	Tie Points Calculados	Tiempo Alineación Fotográfica (s)	Puntos de la Nube Densa Calculados
1	40.000	20.000	16.257	32	785.522
2	40.000	4.000	4.447	26	787.858
3	40.000	500	479	19	759.082



4.3.3 Calidad de la nube densa

A continuación, se procede a valorar el parámetro “Calidad de la nube densa” para la generación de la nube densa. Este parámetro puede tener los siguientes valores; baja, media y alta.

Se han comparado chunks con calidades de la nube densa de puntos distintas. Se observa que a medida que aumenta la calidad se incrementan los puntos reproducidos en la nube densa y estos son más precisos. Con la calidad baja, los puntos tienen mucha dispersión, por lo que tienen baja precisión.

En la Fig. 39, se exponen 9 imágenes de la representación de la manzana con chunks con distinta calidad y distintos números de fotografía por chunk. Se recomienda utilizar la opción de **calidad media**. Mostrándose correctamente la forma del fruto con un tiempo de procesado mucho menor al requerido con la alta calidad (Tabla 15).

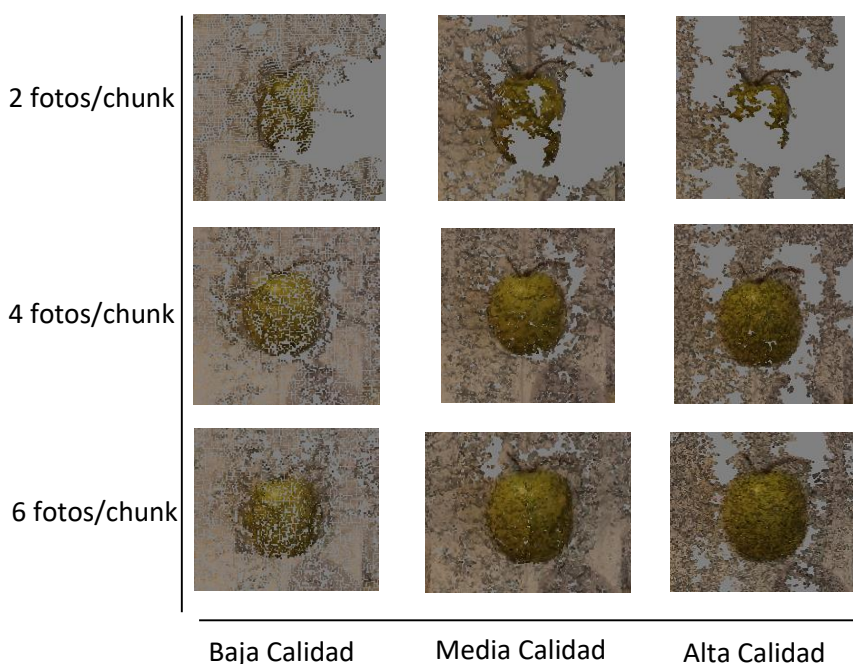


Fig. 39. Representación de 9 imágenes con su respectiva nube densa de puntos, según el número de fotografías por chunk y la calidad de la nube densa.

Tabla 15. Representación del tiempo (calculado con el portátil 1) del proceso de alineación fotográfica y de formación de la nube densa de puntos, variando la calidad de la nube densa con distintos núm. de fotografías por chunk. Se ha fijado la exactitud media y la profundidad de filtraje moderate.

Núm. fotografías por chunk	Calidad		
	Baja (s)	Media (s)	Alta (s)
2 fotografías/chunk	5 y 3 = 8	5 y 10 = 15	5 y 29 = 34
3 fotografías/chunk	8 y 7 = 15	8 y 20 = 28	8 y 83 = 91
4 fotografías/chunk	12 y 12 = 24	12 y 36 = 48	12 y 156 = 168
5 fotografías/chunk	13 y 16 = 29	13 y 49 = 62	13 y 225 = 238
6 fotografías/chunk	16 y 17 = 33	16 y 59 = 75	16 y 277 = 293



4.3.4 Profundidad de filtraje de la nube densa

Debido al ruido o el desenfoque, se pueden generar puntos aislados del conjunto. El parámetro de profundidad de filtraje permite escoger el algoritmo adecuado para la generación de la nube densa. Se pueden elegir 3 modos de profundidad de filtraje, el mild, el moderate y el agresive.

La opción mild no elimina los puntos aislados (Fig. 40a). Mientras que el modo agresive elimina la mayor parte de estos puntos (Fig. 40b). Finalmente, si se quiere utilizar una opción intermedia se seleccionará el modo moderate.

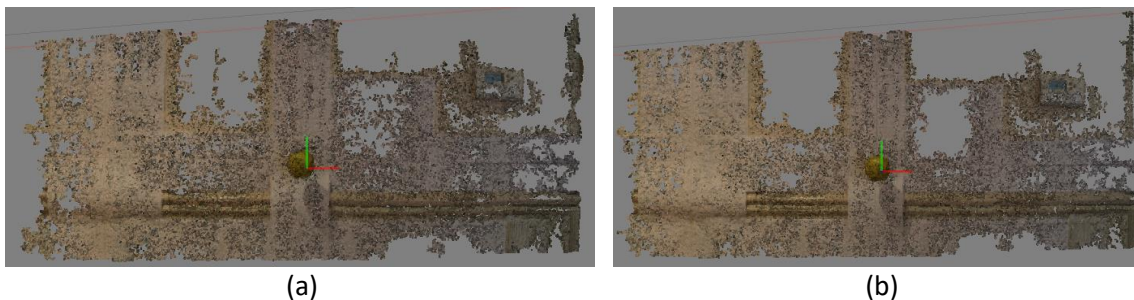


Fig. 40. Representación de una nube de puntos con el modo mild (a) y agresive (b) del parámetro de profundidad de filtraje.

Se han comparado chunks según la profundidad de filtraje (Fig. 41). Se han realizado 18 chunks (6 con filtración mild, 6 moderate y 6 agresive), con distintas fotografías por chunk. Se ha observado que el modo de filtración varía muy poco la cantidad de puntos de la nube densa. Pero se representa mejor la manzana con la opción de profundidad de filtraje mild (Fig. 41a). El tiempo de procesamiento es parecido en los tres modos. Se recomienda utilizar la opción de filtraje mild.

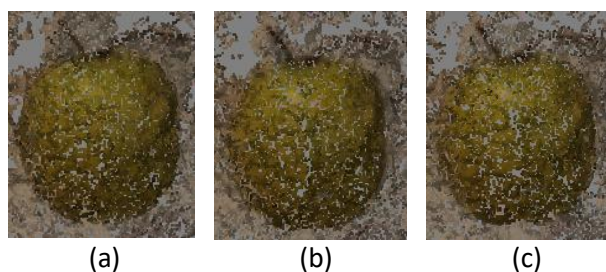


Fig. 41. Representación de la visualización de la manzana con los modos de profundidad de filtraje mild (a), moderate (b) y agresive (c).

4.3.5 Parámetros Agisoft Photoscan para la comparación de los chunks

Para que en los próximos estudios las nubes de puntos sean comparables, se fijan los siguientes parámetros:

Nube poco densa:

- Alineación de fotografías High.
- Límite de key points 40.000.
- Límite de tie points 4.000.

Nube densa:

- Calidad Medium.
- Profundidad de filtraje Mild.



4.4 Estudio del comportamiento del Agisoft Photoscan

Fijados los parámetros, ahora se comprueba cómo trabaja el programa en distintos aspectos (número de fotos por chunk, salto de foto, variación del ISO, tamaño y calidad de imagen, tamaño del chunk y según la alineación de las frutas).

4.4.1 Efecto número de fotos por chunk

A mayor número de fotografías por chunk mejor se representa el fruto (Fig. 42).

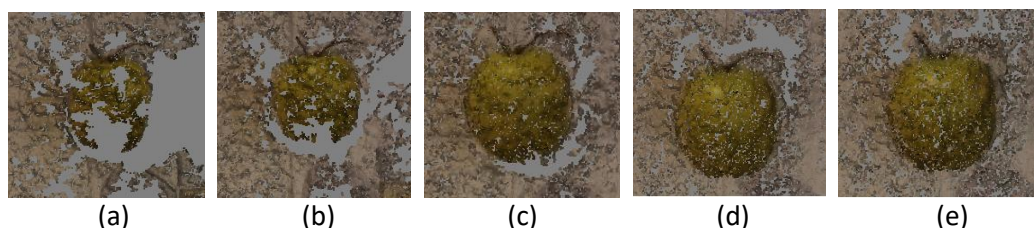


Fig. 42. Representación de la visualización de la manzana, en chunks con 2 (a), 3 (b), 4 (c), 5 (d) y 6 (e) fotografías.

4.4.2 Efecto del salto de foto

La herramienta “view matches” permite visualizar los tie points procesados entre fotografías del chunk. En fotografías con un salto de foto pequeño se identifican más tie points que en fotografías con un salto de foto mayor (Fig. 43).

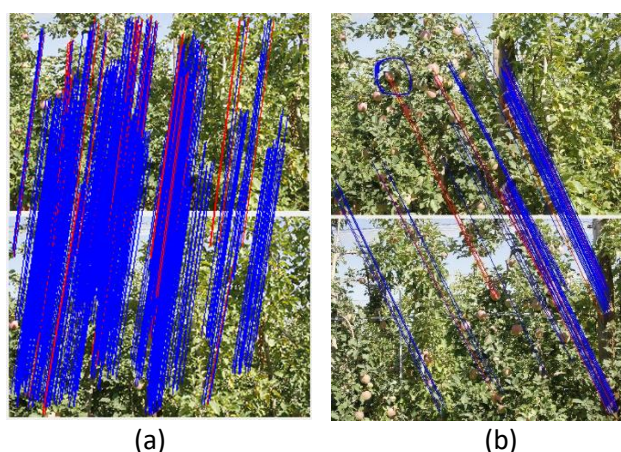


Fig. 43. Representación de la diferencia de identificación de tie points entre fotos con un salto de foto pequeño (a) y fotos con un salto fotográfico mayor (b).

Se expone el siguiente ejemplo utilizando un chunk de 6 fotografías consecutivas (Fig. 44). Donde las fotografías del medio de la serie son las que tienen más tie points con el resto de fotografías. Mientras que las fotografías de los laterales son las que menos tienen.

_DIR3013				_DIR3011			
Photo	Total	Valid	Invalid	Photo	Total	Valid	Invalid
_DIR3011	88	74	14	_DIR3012	227	214	13
_DIR3012	202	181	21	_DIR3013	88	74	14
_DIR3014	199	178	21	_DIR3014	55	41	14
_DIR3015	97	84	13	_DIR3015	21	16	5
_DIR3016	35	29	6	_DIR3016	9	6	3

Fig. 44. La fotografía 3013 (a) se encuentra en medio de la serie fotográfica y tiene 546 puntos tie points, mientras que la fotografía 3011 (b) se encuentra al lateral de la serie fotográfica y tiene 351 tie points válidos.



4.4.3 Efecto del ISO

La fotografía tiene el mismo tamaño de archivo y la misma resolución de píxeles independientemente del valor ISO prefijado.

La generación de tie points y de la nube densa es muy similar indistintamente de la ISO. Por lo tanto, el valor que se ponga al parámetro ISO de la cámara no será determinante en la generación de la nube densa de puntos. La representación de los objetos en la nube densa de puntos generado con ISO 100 (Fig. 45a) es muy parecida a la generada con ISO 3200 (Fig. 45b). Siendo el programa poco sensible a las variaciones del ISO.

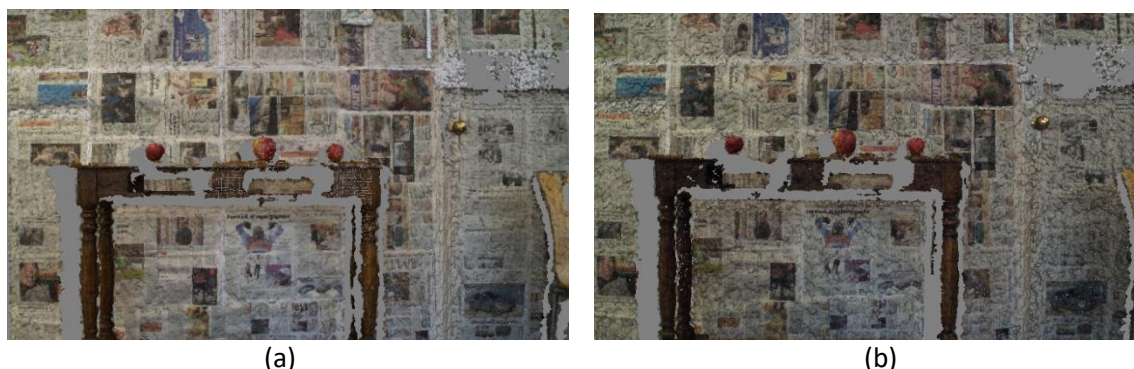


Fig. 45. Representación de la nube de puntos de dos chunks con dos fotografías de ISO 100 (a) y dos fotografías de ISO 3200 (b).

4.4.4 Efecto del tamaño y calidad de imagen

Para observar el efecto de la calidad y el tamaño de la imagen (número de píxeles), se han realizado series fotográficas de 6 fotos a una distancia de trabajo de 1 m y 20 cm de salto de foto. Desarrolladas a continuación:

Para comparar el efecto de la calidad de la imagen se han realizado 2 series fotográficas con calidades de imagen distintas (Fine y Normal) y el mismo tamaño de imagen (L) (Fig. 46). Las dos series se han procesado en el programa Agisoft Photoscan con los mismos parámetros. En ambas series el fruto aparece de forma correcta y un número de puntos muy parecido de la nube densa. El tiempo de procesamiento de los tie points y la nube densa de puntos es muy similar. Por lo tanto, la calidad de la imagen o la variación de la compresión de los archivos no afecta el desarrollo del programa, tal como se muestra en la Fig. 46.



Fig. 46. Representación de las nubes densas de puntos procesadas con imágenes con el mismo número de píxeles (12,1 megapíxeles) pero con calidades de imagen distintas, Normal (a) y Fine (b).

Para comparar el efecto del tamaño de la imagen se han realizado 2 series fotográficas con la misma calidad de imagen (Normal) y distinto tamaño de imagen (L y S) (Fig. 47). Las dos series se han procesado en el programa Agisoft Photoscan con los mismos parámetros. En la Fig. 47, se observa como el número de puntos de la nube densa es inferior en el chunk con el tamaño de imagen S (Fig.



47b). El tiempo de procesamiento de los tie points y de la nube densa ha sido de 75 s en el chunk con el tamaño de imagen L y de 21 s en el chunk con el tamaño de imagen S. Por lo tanto, la variación del tamaño de la imagen afecta el desarrollo del programa.



Fig. 47. Representación de las nubes densas de puntos procesadas con imágenes con la misma calidad de imagen (Normal) pero con distinto número de píxeles, 12,1 megapíxeles (a) y 3,54 megapíxeles (b).

Para el estudio del procesado y obtención de los frutos fotografiados con el programa Agisoft Photoscan se recomienda escoger en la cámara los formatos de la calidad de imagen Normal JPG y del tamaño de imagen L.

4.4.5 Tamaño del chunk

El tamaño de la nube densa depende del número de fotografías que contiene el chunk, de la escena fotografiada (núm. de tie points), de la nitidez de las fotografías, del tamaño de la imagen, del salto de foto, de la calidad y de la profundidad de filtraje de la nube densa.

Cuando se exporta el chunk y se guarda en formato XYZ Point Cloud (.txt), se puede observar como el tamaño de los archivos de texto varía dependiendo del número de puntos de la nube densa. Porque para cada punto se genera una línea de texto con sus coordenadas x, y, z. Por lo tanto, a mayor número de puntos en la nube densa, mayor será el tamaño de los archivos de texto.

En la Tabla 16 se muestran 3 ejemplos de tamaño de fichero de texto según el número de puntos de la nube densa.

Tabla 16. Representación del tamaño del documento de texto del chunk según los puntos de la nube densa.

Núm. de puntos de la Nube Densa	Tamaño documento (.txt) del chunk (MB)
240.000	16
640.000	41
1.000.000	71

Destacar, que el tiempo de proceso de la exportación de los puntos del chunk también aumenta con el número de puntos de la nube densa.



4.4.6 Objetos alineados o en profundidades distintas

Se ha comprobado si el fruto de estudio es representado mejor en el Agisoft Photoscan, según su posición respecto al resto de frutos. Para ello, se han realizado un total de 9 series fotográficas. Cada serie fotográfica contiene 5 fotografías y constituye un chunk. Las 9 series fotográficas se componen en:

- 3 series a 1, 2 y 3m de distancia de trabajo con solamente un fruto (Figs. 48a, 49a y 50a).
- 3 series a 1, 2 y 3m de distancia de trabajo con los frutos alineados (Figs. 48b, 49b y 50b).
- 3 series a 1, 2 y 3m de distancia de trabajo con los frutos sin alinear (Figs. 48c, 49c y 50c).

Se ha comparado el fruto colocado en el centro entre los distintos chunks y el resultado es muy parecido (Figs. 48, 49 y 50). Por lo tanto, en este escenario, el programa Agisoft Photoscan calcula la nube de puntos de la manzana central de forma muy similar indistintamente del número de manzanas colocadas en la escena y de su colocación. Respecto al número de tie points y puntos de la nube densa, destacar que se muestran valores bastante parecidos en los distintos chunks.

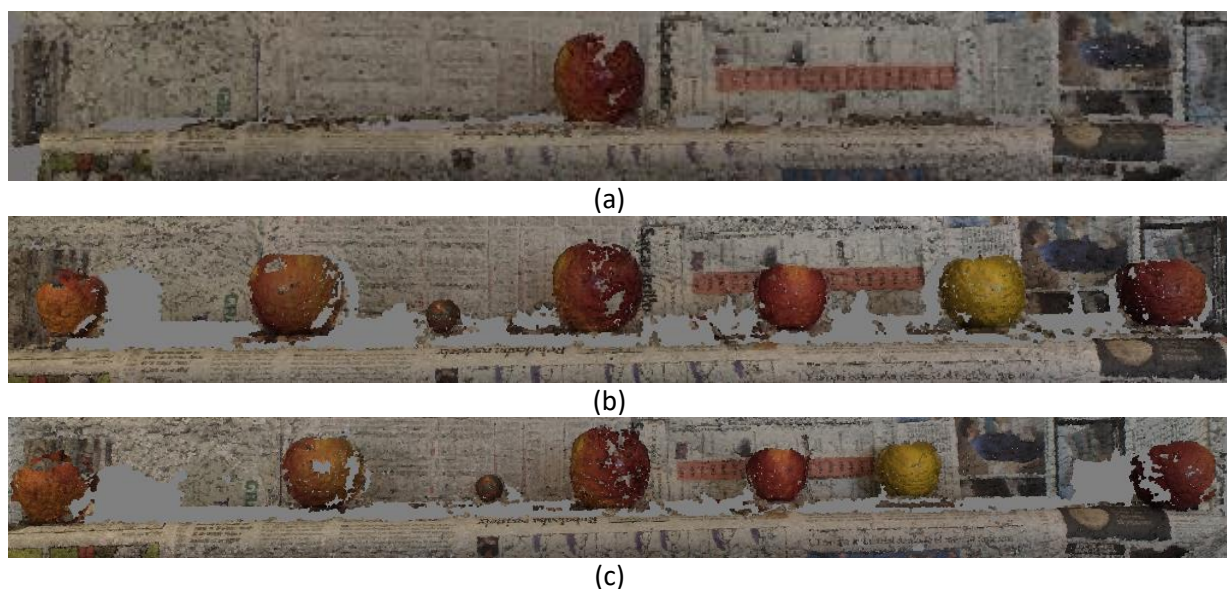


Fig. 48. Representación de la nube de puntos de la manzana central a 1m de dt sin añadir manzanas (a), con frutos alineados (b) y sin frutos alineados (c).



(a)



(b)



(c)

Fig. 49. Representación de la nube de puntos de la manzana central a 2m de dt sin añadir manzanas (a), con frutos alineados (b) y sin frutos alineados (c).



(a)



(b)



(c)

Fig. 50. Representación de la nube de puntos de la manzana central a 3m de dt sin añadir manzanas (a), con frutos alineados (b) y sin frutos alineados (c).



4.5 Estudio del número de puntos mínimos en RSD

En este punto se estudia el parámetro de configuración “número de puntos mínimos” del RSD en el CloudCompare.

A medida que aumenta la distancia el número de puntos que componen la fruta es menor. Y el RSD tiene que detectar y generar las dimensiones de las esferas con una cantidad menor de puntos. En la Fig. 51 se observa la evolución de la nube de puntos de menos a más dt en la manzana mediana.

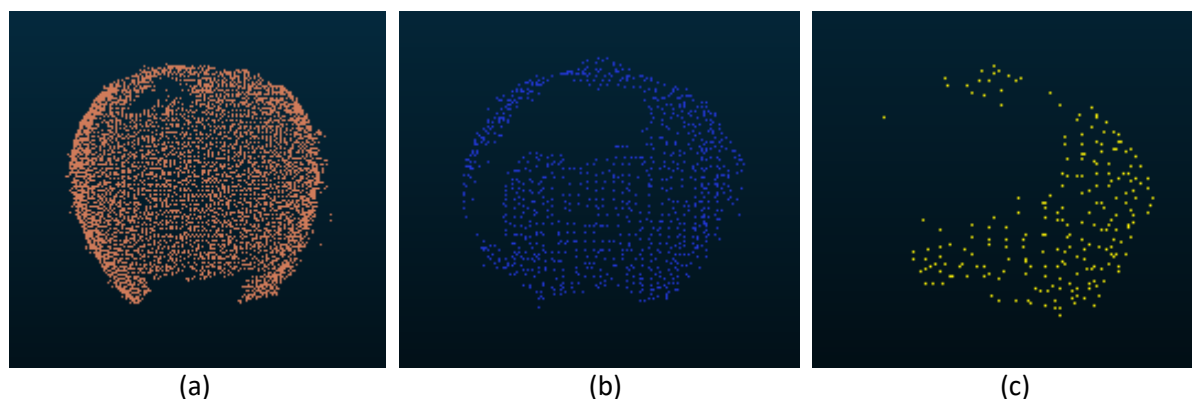


Fig. 51. Representación de la nube de puntos de la manzana mediana a 1m (a), 2m (b) y 3m (c) de dt.

Por este motivo, a 2 m y a 3 m se tiene que disminuir el número de puntos mínimos para la detección de esferas del RSD. En general, el cambio de puntos mínimos no afecta en la detección y dimensionado de la fruta. Por ejemplo, en la Fig. 52, se muestra la fruta pequeña a una dt de 1m (Fig. 52a), utilizando 100 puntos mínimos y 500 puntos mínimos (Fig. 52b). En ambas esferas se detecta el mismo número de puntos y el valor del radio de la fruta es el mismo, 1,42 cm.

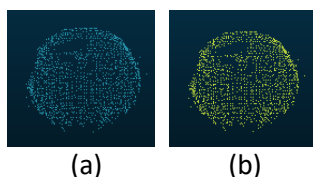


Fig. 52. Representación de la nube de puntos de la manzana pequeña a 1m de dt, con 100 puntos mínimos (a) y 500 puntos mínimos (b).

El inconveniente de utilizar un número bajo de puntos mínimos del RSD es la generación de más de una esfera en la misma fruta. En este trabajo, a mayor dt el RSD detecta erróneamente una mayor cantidad de esferas en la fruta de estudio. En la Fig. 53a, Fig. 53b y Fig. 53c se han utilizado 50 puntos mínimos para la detección de la fruta grande. A una dt de 3 m tiene puntos de distintos colores. Que representan detecciones de distintas esferas en la misma fruta (Fig. 53c). Mientras que a una dt de 1 m se detecta el conjunto de puntos que conforman la manzana en una sola esfera (Fig. 53a).

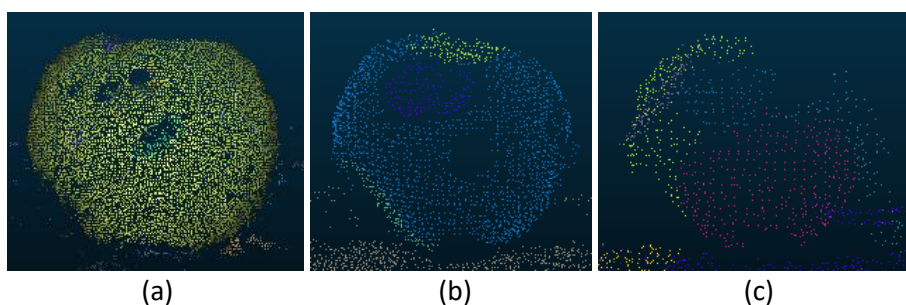


Fig. 53. Representación de la nube de puntos manzana grande a una dt de 1 m (a), 2 m (b) y 3 m (c) con el RSD con 50 puntos mínimos.



Por lo tanto, no se recomienda utilizar el RSD en nubes de puntos generadas con fotografías tomadas a 3 m de distancia, porque detecta erróneamente esferas de distintas dimensiones en una misma fruta (Fig. 53c).

A 2 m se ha utilizado 25 puntos mínimos en el RSD para poder detectar la fruta pequeña en más situaciones. Comprobando previamente que las dimensiones de la fruta proporcionadas con 25 puntos mínimos fueran parecidas a las generadas con 50 puntos mínimos. En la Fig. 54 se puede observar la evolución en la detección de las frutas a una dt de 2 m, utilizando 100 puntos mínimos (Fig. 54b), 50 puntos mínimos (Fig. 54c) y 25 puntos mínimos (Fig. 54d). Destacando que los puntos detectados son muy parecidos en los 3 casos.

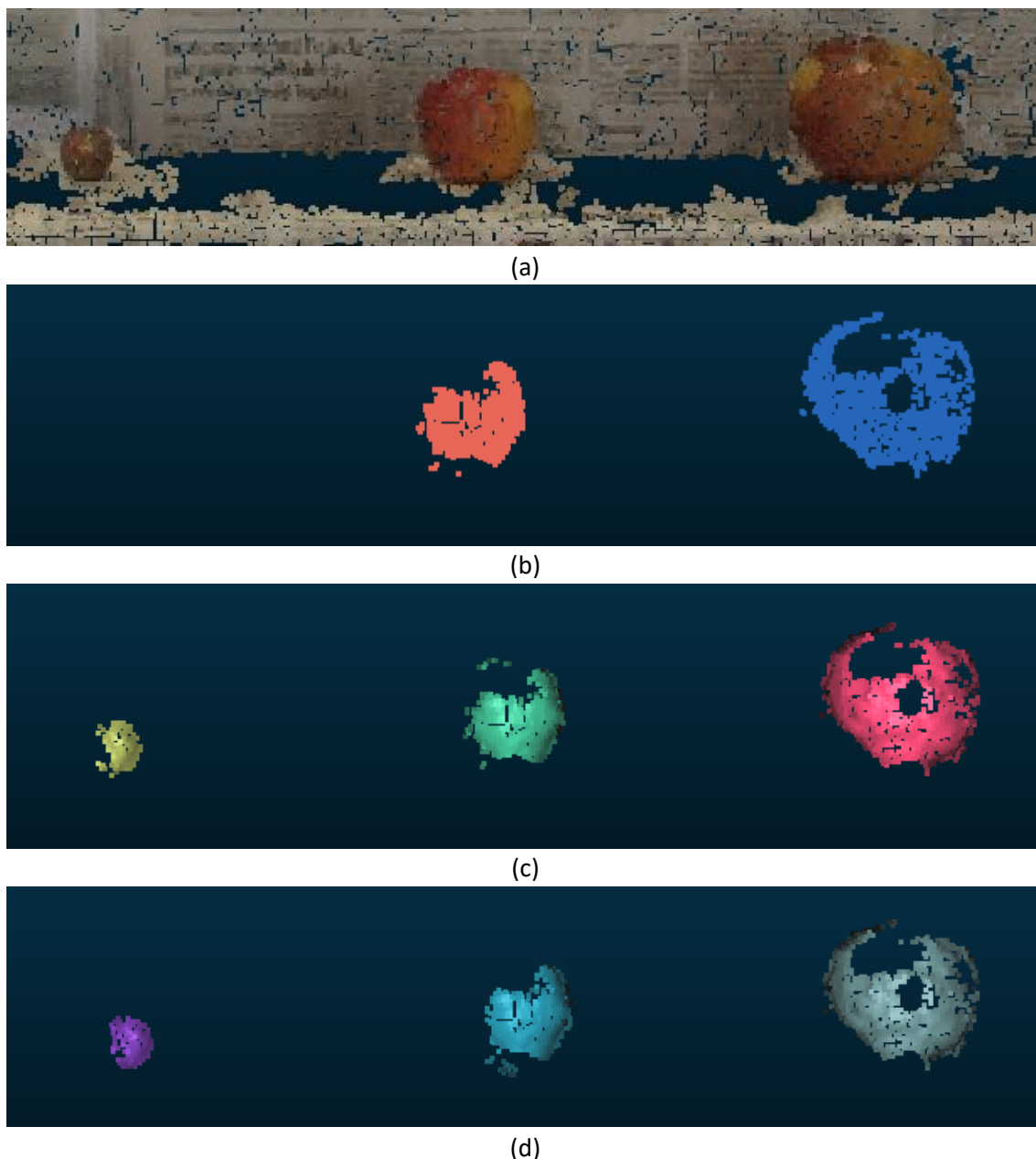


Fig. 54. Representación de la nube de puntos con el método lineal con una dt de 2 m, 5 fotos y un salto de foto de 50 cm (a), y las detecciones de las frutas con 100 puntos mínimos (b), 50 (c) y 25 (d).



A 3m se configura para la fruta mediana y grande y se ha utilizado 50 puntos mínimos. Porque con 25 puntos mínimos el RSD daba un error muy elevado en el cálculo de las dimensiones de la fruta pequeña. Con 50 puntos, la fruta pequeña no es detectada. Y con 50 puntos mínimos se evita que se detecten tantas esferas en las frutas mediana y grande. En la Fig. 55 se muestra la detección de la fruta grande a 3 m de dt con el método de la cruz con distintos valores de puntos mínimos del RSD.

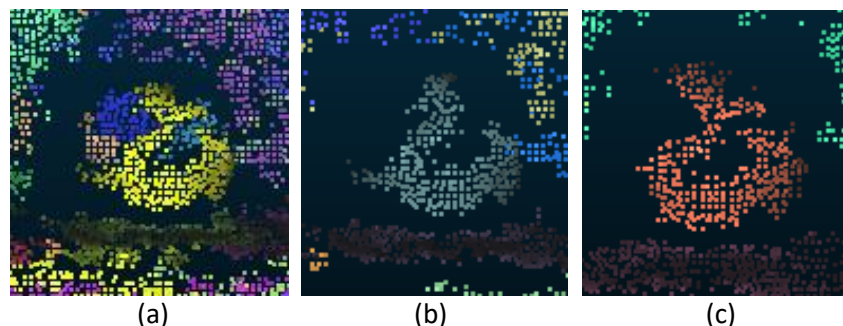


Fig. 55. Representación de la detección de la fruta grande a 3 m de dt con el método de la cruz mediante 25 puntos mínimos del RSD (a), 50 puntos mínimos (b) y 100 puntos (c).

Como norma general, a menor dt se puede utilizar un mayor número de puntos mínimos para la detección de esferas. En la Tabla 17, se muestran el número mínimos de puntos por esfera utilizados según la dt de la serie fotográfica.

Tabla 17. Representación de los puntos mínimos utilizados para la detección de esferas según la dt en la toma de fotografías de la nube de puntos.

dt (m) Nube de Puntos	Puntos Mínimos Detección Esfera
1	100
2	25
3	50

4.6 Forma de la fruta

Un aspecto a tener en cuenta es la forma geométrica de la manzana. A pesar que la fruta mediana y grande no son esferas, el RSD las detecta. En la Fig. 56 se muestra con una dt de 1m la nube de puntos de la manzana mediana (Fig. 56a) y la esfera detectada con el RSD (Fig. 56b). En la Fig. 57 y Fig. 58 se muestra con una dt de 1 m la nube de puntos de la manzana grande (imagen izquierda) y la esfera detectada con el RSD (imagen derecha). En los tres casos se observa que la esfera se ajusta a la forma de la fruta.

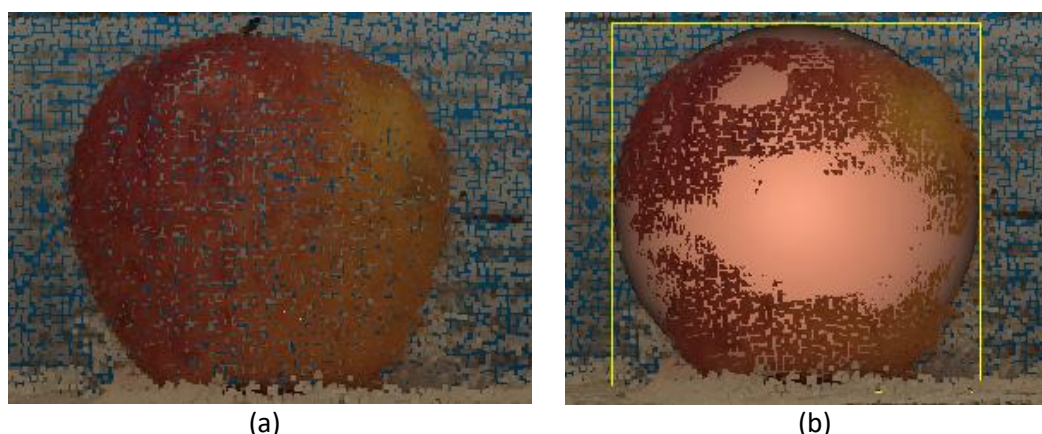
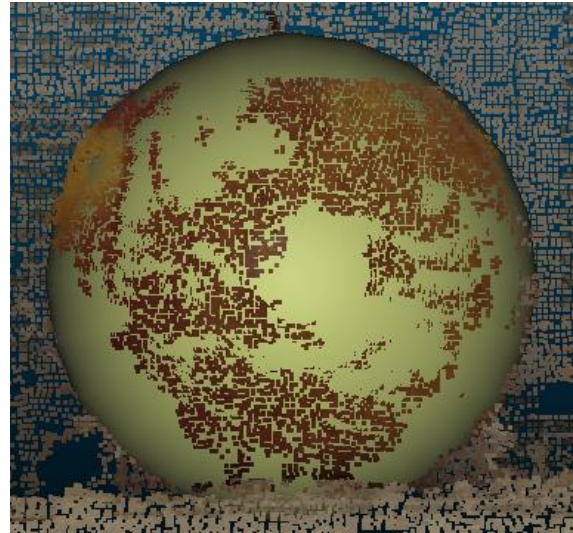


Fig. 56. Representación de la nube de puntos de la fruta mediana a una dt de 1 m con el método lineal, 9 fotos, salto de foto de 10 cm (a) y las dimensiones de la esfera detectada con el RSD (b).

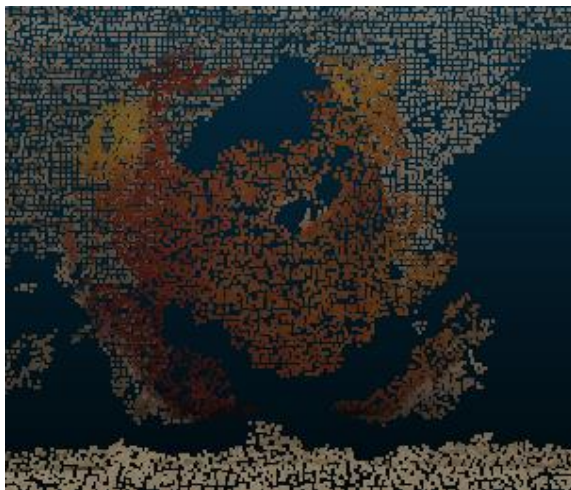


(a)



(b)

Fig. 57. Representación de la nube de puntos de la fruta grande a una dt de 1 m con el método lineal, 5 fotos, salto de foto de 20 cm (a) y las dimensiones de la esfera detectada con el RSD (b).



(a)



(b)

Fig. 58. Representación de la nube de puntos de la fruta grande a una dt de 1 m con el método lineal, 3 fotos, salto de foto de 30 cm (a) y las dimensiones de la esfera detectada con el RSD (b).



4.7 Resultados detección y caracterización geométrica

Los resultados obtenidos en este punto salen de aplicar todos los conceptos estudiados durante el trabajo (estudio del funcionamiento de la cámara y sus parámetros, estudios de los parámetros y comportamiento del Agisoft Photoscan y del número de puntos mínimos del RSD).

En este punto se muestran los resultados de detección y caracterización del RSD de las tres frutas de estudio en nubes de puntos generadas con distintos métodos.

- Relación pxf/pxt y $(pxaf \times pxhf)$

Previo a los resultados de detección y caracterización, en la Tabla 18 se muestran los valores (calculados con la pestaña FOV Empírico de la hoja de cálculo) de las 3 frutas de estudio en las 3 dt de la relación píxeles marco fruta entre píxeles totales (%) y del número de píxeles del marco de la fruta con una separación de la fruta respecto el plano de referencia de 20 cm.

Tabla 18. Valores de los tres tamaños de fruta a las tres distancias de la relación píxeles marco de la fruta entre píxeles totales (%) y del número de píxeles del marco de la fruta con una separación de la fruta respecto el plano de referencia de 20 cm. Calculados en la pestaña FOV Empírico de la hoja de cálculo.

dt	Tamaño Fruta	Relación pxf/pxt (%)	$pxaf \times pxhf$
1	Pequeña	0,15	135,4 x 138,4
	Mediana	0,62	275,7 x 271,9
	Grande	1,10	386,9 x 346,1
2	Pequeña	0,03	58,6 x 59,5
	Mediana	0,11	119,3 x 116,8
	Grande	0,21	167,4 x 148,7
3	Pequeña	0,01	37,4 x 38,0
	Mediana	0,05	76,2 x 74,6
	Grande	0,08	107,0 x 94,9



- Fruta pequeña (1m dt)

En la Tabla 19, se muestran los resultados a 1 m de dt con la fruta pequeña:

Tabla 19. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 1 m de dt de la fruta pequeña con los 5 métodos aplicados.

dt 1 m					
Fruta Pequeña (1,40 cm de radio)					
Método	Número de fotos	Salto de foto (cm)	Radio (RSD) (cm)	Error	Comentarios
Lineal	9	10	1,42	1,46 %	
	5	20	1,38	-1,50 %	
	3	30	1,45	3,31 %	
	3	40	/	/	No detecta en CC
Estereoscópico	2	10	1,59	13,49 %	
	2	20	1,52	8,54 %	
	2	40	/	/	No detecta en CC
Central	3	10	1,51	7,95 %	
	3	20	1,45	3,36 %	
	3	30	1,38	-1,72 %	
	3	40	/	/	No detecta en CC
Vertical	3	10	1,60	14,54 %	
Cruz	5	10 horiz. 10 vert.	1,46	4,13 %	



- Fruta mediana (1 m dt)

En la Tabla 20, se muestran los resultados a 1 m de dt con la fruta mediana:

Tabla 20. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 1 m de dt de la fruta mediana con los 5 métodos aplicados.

dt 1 m					
Fruta Mediana (2,85 cm de radio)					
Método	Número de fotos	Salto de foto (cm)	Radio (RSD) (cm)	Error	Comentarios
Lineal	9	10	2,93	2,96 %	
	5	20	2,90	1,73 %	
	3	30	3,10	8,67 %	
	3	40	3,49	22,52 %	
Estereoscópico	2	10	3,21	12,59 %	
	2	20	3,49	22,52 %	
	2	40	4,55	59,68 %	
Central	3	10	3,20	12,34 %	
	3	20	3,25	14,04 %	
	3	30	3,51	23,30 %	
Vertical	3	10	3,43	20,41 %	
Cruz	5	10 horiz. 10 vert.	3,01	5,72 %	



- Fruta grande (1 m dt)

En la Tabla 21, se muestran los resultados a 1 m de dt con la fruta grande:

Tabla 21. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 1 m de dt de la fruta grande con los 5 métodos aplicados.

dt 1 m					
Fruta Grande (4,00 cm de radio)					
Método	Número de fotos	Salto de foto (cm)	Radio (RSD) (cm)	Error	Comentarios
Lineal	9	10	4,03	0,74 %	
	5	20	4,10	2,54 %	
	3	30	4,05	1,27 %	
	3	40	4,82	20,52 %	
Estereoscópico	2	10	4,89	22,31 %	
	2	20	4,50	12,58 %	
	2	40	4,70	17,48 %	
Central	3	10	4,43	10,63 %	
	3	20	4,57	14,33 %	
	3	30	4,62	15,52 %	
Vertical	3	10	4,52	13,05 %	
Cruz	5	10 horiz. 10 vert.	4,09	2,37 %	



- Fruta pequeña (2 m dt)

En la Tabla 22, se muestran los resultados a 2 m de dt con la fruta pequeña:

Tabla 22. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 2 m de dt de la fruta pequeña con los 5 métodos aplicados.

dt 2 m					
Fruta Pequeña (1,40 cm de radio)					
Método	Número de fotos	Salto de foto (cm)	Radio (RSD) (cm)	Error	Comentarios
Lineal	21	10	1,75	24,83 %	
	11	20	1,61	14,98 %	
	7	30	1,54	10,01 %	
	6	40	2,28	62,82 %	<i>Outlier</i>
	5	50	1,48	5,38 %	
	4	60	/	/	No aparece en AP
Estereoscópico	2	10	1,85	32,38 %	
	2	20	1,83	30,99 %	
	2	40	/	/	No aparece en AP
Central	3	10	1,67	19,42 %	
	3	20	1,85	32,01 %	
	3	30	2,08	48,73 %	
	3	40	1,67	19,49 %	
	3	50	/	/	No aparece en AP
Vertical	3	20,7	2,46	75,46 %	
Cruz	5	10 horiz. 20,7 vert.	1,80	28,80 %	



- Fruta mediana (2 m dt)

En la Tabla 23, se muestran los resultados a 2 m de dt con la fruta mediana:

Tabla 23. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 2 m de dt de la fruta mediana con los 5 métodos aplicados.

dt 2 m					
Fruta Mediana (2,85 cm de radio)					
Método	Número de fotos	Salto de foto (cm)	Radio (RSD) (cm)	Error	Comentarios
Lineal	20	10	2,87	0,56 %	
	10	20	2,86	0,44 %	
	7	30	2,76	-3,14 %	
	5	40	2,81	-1,38 %	
	4	50	2,68	-5,90 %	
	4	60	2,79	-2,02 %	
	3	70	2,78	-2,62 %	
	3	80	2,41	-15,29 %	
	3	90	3,09	8,59 %	
Estereoscópico	2	10	3,06	7,41 %	
	2	20	3,78	32,66 %	
	2	40	5,27	84,92 %	
	2	60	4,22	48,08 %	
Central	3	10	3,02	6,09 %	
	3	20	2,98	4,56 %	
	3	30	2,72	-4,61 %	
	3	40	3,00	5,36 %	
	3	50	2,64	-7,32 %	
	3	60	3,23	13,39 %	
	3	70	2,98	4,62 %	
Vertical	3	20,7	3,42	19,95 %	
Cruz	5	10 horiz. 20,7 vert.	3,02	6,00 %	



- Fruta grande (2 m dt)

En la Tabla 24, se muestran los resultados a 2 m de dt con la fruta grande:

Tabla 24. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 2 m de dt de la fruta grande con los 5 métodos aplicados.

dt 2 m					
Fruta Grande (4,00 cm de radio)					
Método	Número de fotos	Salto de foto (cm)	Radio (RSD) (cm)	Error	Comentarios
Lineal	20	10	3,96	-0,98 %	
	10	20	3,89	-2,87 %	
	7	30	3,93	-1,76 %	
	5	40	3,88	-3,11 %	
	4	50	4,17	4,16 %	
	4	60	4,00	-0,02 %	
	3	70	4,19	4,81 %	
Estereoscópico	2	10	5,07	26,69 %	
	2	20	3,91	-2,15 %	
	2	40	4,36	8,89 %	
	2	60	4,47	11,80 %	
Central	3	10	4,24	6,11 %	
	3	20	3,97	-0,66 %	
	3	30	3,99	-0,37 %	
	3	40	3,98	-0,61 %	
	3	50	4,14	3,55 %	
	3	60	3,98	-0,51 %	
	3	70	4,00	0,11 %	
	3	80	4,41	10,32 %	
Vertical	3	20,7	4,98	24,58 %	
Cruz	5	10 horiz. 20,7 vert.	3,94	-1,57 %	



- Fruta pequeña (3 m dt)

En la Tabla 25, se muestran los resultados a 3 m de dt con la fruta pequeña:

Tabla 25. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 3 m de dt de la fruta pequeña con los 5 métodos aplicados.

dt 3 m					
Fruta Pequeña (1,40 cm de radio)					
Método	Número de fotos	Salto de foto (cm)	Radio (RSD) (cm)	Error	Comentarios
Lineal	32	10	/	/	No se detecta en CC
	16	20	/	/	No se detecta en CC
	11	30	/	/	No se detecta en CC
	8	40	/	/	No se detecta en CC
	7	50	/	/	No se detecta en CC
	6	60	/	/	No se detecta en CC
	5	70	/	/	No aparece en AP
Estereoscópico	2	10	/	/	No se detecta en CC
	2	20	/	/	No se detecta en CC
	2	40	/	/	No aparece en AP
Central	3	10	/	/	No se detecta en CC
	3	20	/	/	No se detecta en CC
	3	30	/	/	No se detecta en CC
	3	40	/	/	No se detecta en CC
	3	50	/	/	No aparece en AP
Vertical	3	31,2	/	/	No se detecta en CC
Cruz	5	10 horiz. 31,2 vert.	/	/	No se detecta en CC



- Fruta mediana (3 m dt)

En la Tabla 26, se muestran los resultados a 3 m de dt con la fruta mediana:

Tabla 26. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 3 m de dt de la fruta mediana con los 5 métodos aplicados.

dt 3 m					
Fruta Mediana (2,85 cm de radio)					
Método	Número de fotos	Salto de foto (cm)	Radio (RSD) (cm)	Error	Comentarios
Lineal	32	10	2,76	-3,19 %	
	16	20	2,52	-11,62 %	
	11	30	2,60	-8,69 %	
	8	40	2,66	-6,56 %	
	7	50	3,05	7,00 %	
	6	60	8,42	195,45 %	<i>Outlier</i>
	5	70	2,63	-7,84 %	
	4	80	/	/	No se detecta en CC
	4	90	3,75	31,46 %	
Estereoscópico	2	10	/	/	No se detecta en CC
	2	20	/	/	No se detecta en CC
	2	40	2,78	-2,45 %	
	2	60	12,66	344,16 %	<i>Outlier</i>
	2	80	2,63	-7,56 %	
	2	100	/	/	No se detecta en CC
Central	3	10	3,16	10,79 %	
	3	20	3,26	14,56 %	
	3	30	2,82	-1,05 %	
	3	40	2,32	-18,59 %	
	3	50	2,51	-11,92 %	
	3	60	3,09	8,27 %	
	3	70	/	/	No se detecta en CC
Vertical	3	31,2	4,19	47,12 %	
Cruz	5	10 horiz. 31,2 vert.	3,20	12,13 %	



- Fruta grande (3 m dt)

En la Tabla 27, se muestran los resultados a 3 m de dt con la fruta grande:

Tabla 27. Resultados obtenidos a partir de fotografías hechas a 3 m de dt de la fruta grande con los 5 métodos aplicados.

dt 3 m					
Fruta Grande (4,00 cm de radio)					
Método	Número de fotos	Salto de foto (cm)	Radio (RSD) (cm)	Error	Comentarios
Lineal	32	10	2,77	-30,86 %	
	16	20	2,78	-30,52 %	
	11	30	2,82	-29,52 %	
	8	40	2,78	-30,59 %	
	7	50	2,70	-32,62 %	
Estereoscópico	2	10	/	/	No se detecta en CC
	2	20	8,81	120,26 %	<i>Outlier</i>
	2	40	3,57	-10,63 %	
	2	60	4,02	0,51 %	
	2	80	2,98	-25,42 %	
Central	3	10	4,34	8,41 %	
	3	20	4,18	4,60 %	
	3	30	3,52	-11,93 %	
	3	40	2,72	-32,03 %	
	3	50	2,87	-28,16 %	
	3	60	2,93	-26,70 %	
	3	70	3,26	-18,47 %	
	3	80	2,65	-33,72 %	
	3	90	2,97	-25,63 %	
Vertical	3	31,2	4,34	8,56 %	
Cruz	5	10 horiz. 31,2 vert.	3,51	-12,14 %	



4.8 Discusión resultados detección y caracterización geométrica

A partir de los resultados de detección y caracterización, se discute el efecto del tamaño de las frutas y los métodos a 1, 2 y a 3 m.

4.8.1 Tamaño de la fruta según la dt

- Fruta pequeña: A 1 m se detecta y el error del radio es bajo. A 2 m se detecta, pero aumenta el error del radio. A 3 m no se detecta la fruta. A medida que aumenta la distancia se empeora la detección y medición de la fruta.
- Fruta mediana: A 1 m, 2 m y 3 m la fruta se detecta y el error es bajo.
- Fruta grande: A 1 m y 2 m se detecta y el error es bajo. A 3 m se detecta, pero el error aumenta.

Las tres frutas son detectadas a 1 m y a 2 m de dt.

Los resultados indican que existe una tendencia, al aumentar la distancia aumenta el error de la fruta y se pierde capacidad de detección. Porque a medida que aumenta la dt el número de puntos que componen la fruta es menor y dificulta la labor del RANSAC.

Este efecto se agrava en la fruta pequeña, con solo 37,4 x 38,0 px marco fruta a 3 m de dt con la resolución de nuestra cámara. Al aumentar la dt es más difícil de ser detectada. Sufriendo un error de dimensiones mayor que la fruta mediana y grande.

4.8.2 Métodos según la dt

A 1 m de dt los cinco métodos estudiados permiten la detección de las frutas. Los métodos lineal (hasta con 3 fotos y un salto de foto de 30 cm) y cruz dan un error de dimensiones de las esferas bajo. Con el método central (hasta con 3 fotos y un salto de foto de 30 cm) se incrementa el error. Y los métodos que dan un mayor error son el estereoscópico y el vertical.

A 1 m de dt solamente con dos fotografías, la fruta de estudio se podría detectar y dimensionar. Con el método estereoscópico el procesamiento de información y el tratamiento de datos se agilizaría.

A 1 m de dt las dimensiones de la fruta grande, con 386,9 x 346,1 px marco fruta, no presentan un inconveniente y puede ser detectada con cualquier método de estudio.

A 2 m de dt los cinco métodos estudiados permiten la detección de las frutas. La fruta pequeña da un error de dimensiones de la esfera alto con todos los métodos. En las frutas mediana y grande los métodos que dan un error más bajo son el lineal (hasta con 3 fotos y un salto de foto de 70 cm), el central (hasta con 3 fotos y un salto de foto de 70 cm) y la cruz. Mientras que los métodos que dan un mayor error son el estereoscópico y el vertical.

A 2 m de dt, el mínimo de fotografías que se recomienda para la detección y el correcto dimensionamiento son tres. Mediante el método central.

A 2 m de dt, con los métodos lineal y central, la fruta mediana y grande puede ser detectada con un salto de foto mayor que la fruta pequeña.



A 3 m de dt la fruta pequeña no es detectada con ningún método. En la fruta mediana y grande el método estereoscópico no sirve para la correcta detección y dimensionamiento de la fruta. En la fruta mediana los métodos que dan un menor error son el lineal (hasta con 7 fotos y un salto de foto de 50 cm), el método central (hasta con 3 fotos y un salto de foto de 60 cm) y la cruz. El método vertical da un error muy elevado. En la fruta grande los métodos que dan un menor error son el central (hasta con 3 fotos y un salto de foto de 30 cm), el vertical y la cruz. Mientras que el método lineal da un error mayor.

A 3 m de dt con tres fotografías, mediante el método central, sería suficiente para la detección y el correcto dimensionamiento de las frutas mediana y grande.

En las dt estudiadas los métodos lineal, central y cruz son los más idóneos para la detección y el cálculo de las dimensiones de la fruta con un menor error.

Destacar que a 2 m de dt con los métodos lineal y central se puede llegar a detectar la fruta mediana y grande con 3 fotos con un salto de foto de 70 cm, mientras que a 1 m de dt se detectan con 3 fotos y un salto de foto de 30 cm. A 3 m de dt no se recomienda utilizar un salto de foto elevado, debido a la baja cantidad de puntos que conforman la fruta y la detección de múltiples esferas en un mismo fruto.

Contrario a lo esperado, a 3 m de dt la fruta mediana sufre un error menor que la fruta grande con los métodos lineal y central. La baja cantidad de puntos a esta dt y la forma más achatada de la fruta grande podrían propiciar en el RANSAC dificultades en la correcta detección de la manzana y errores de tamaño.



5. CONCLUSIONES

El desempeño de este trabajo experimental ha tenido como finalidad dar a conocer los distintos resultados obtenidos en una primera toma de contacto en la detección y caracterización de frutas mediante fotogrametría. Con la intención de abrir un campo de interés y seguir con la investigación.

Para concretar mejor los estudios, en esta fase inicial de la investigación, se ha trabajado en un escenario en el interior de casa. En proyectos futuros se tendrá que comprobar cómo afectan en los resultados los efectos de sombras, oclusiones y del desplazamiento de los objetos fotografiados típicos en campo.

Al tratarse de un trabajo inicial en el campo de la fotogrametría se han realizado un conjunto de pruebas con la intención de explicar los elementos principales en una cámara fotográfica, que intervienen en el proceso fotográfico, para adecuar correctamente los parámetros de la cámara. Seguidas de estudios para conocer el comportamiento del programa Agisoft Photoscan, el CloudCompare y el RANSAC.

También se han desarrollado los parámetros fotográficos que intervienen en la generación de la nube de puntos. Y se ha estudiado como afectan en la detección y caracterización de las frutas.

Debido a que el aumento de la dt es un factor crítico en la detección y caracterización de frutas, en trabajos futuros se recomienda utilizar cámaras fotográficas con una resolución de imagen mayor. Ayudando a mantener un número de puntos suficientes en las frutas para su detección.

Será interesante ver como mejoran los métodos de estudio con una mayor resolución. Tomando especial atención al método estereoscópico a 2 m y a 3 m de dt . Porque es el que permitiría un procesamiento más rápido. Siempre pensando en el mínimo de fotografías posibles para la detección y caracterización de la fruta.

Por otra parte, el desarrollo de la hoja de cálculo ayudará a los usuarios a conocer de forma rápida los resultados de los parámetros fotográficos (número de fotogramas, píxeles marco fruta, velocidad en la toma de fotos horizontales y total fotografías por hilera) obtenidos con los datos escogidos para la serie fotográfica (dt , separación de la fruta respecto plano de referencia, salto de foto, velocidad toma de fotografías y dimensiones de la hilera fotografiada) y específicos de la cámara. Facilitando la toma de decisión final.

A largo plazo, interesará poder utilizar la fotogrametría para apoyar el desarrollo de las tareas agrícolas. Con la incorporación de cámaras o móviles en el tractor, se podrá contabilizar la cantidad de frutas por hilera y sus dimensiones. Información que será de utilidad al técnico o agricultor para tener una proyección de la cosecha de temporada y de las prácticas agrícolas. El proceso de detección y calibración mediante fotogrametría también podría ser utilizada para la recolección automática de frutas. Propiciando un ahorro del agricultor en los costes de mano de obra.

Finalmente, comentar que el trabajo de elaboración del TFG se ha realizado mayormente durante el periodo de confinamiento por el coronavirus, situación que de algún modo ha obligado a buscar y encontrar las soluciones más óptimas dentro de las limitaciones de dicho confinamiento.



6. BIBLIOGRAFÍA

Agisoft, L. y St Petersburg, R. (2017). Agisoft Photoscan. *Professional Edition*.

Cámara digital FinePix S5 Pro, Fujifilm (2007). Manual del usuario. Fujifilm Corporation.

Fischler, M. A. y Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, vol. 24, no. 6, pp 381 - 395.

Iglesias, I. (2019). Sistemas de plantación 2D: una novedad en almendro, una realidad en frutales. Hacia una alta eficiencia. *Revista de Fruticultura*, no. 67, pp 22 - 44.

Linker, R.; Cohen, O.; Naor, A. (2012). Determination of the number of Green apples in RGB images recorded in orchards. *Comput. And Electr. In Agri.*, vol. 81, pp 45 – 57.

Rosell-Polo, J.R. y Sanz, R. (2012). A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Comput. and Electr. in Agri.*, vol 81, pp 124-141.

Verhoeven, G. (2007). Did the digital (r)evolution change the concept of focal lenght? *AARGnews* 34.

Wenbo, D.; Pravakar, R. y Volkan, I. (2019). Semantic mapping for orchard enviromnments by merging two-sides reconstructions of tree rows. *Journal of Field Robotics*.



7. ANEXOS

7.1 Especificaciones técnicas de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro

A continuación, se muestran las especificaciones técnicas del sistema, de los terminales de entrada y salida, de alimentación, de la capacidad de la tarjeta de memoria y de la calidad/tamaño de la imagen de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro (Fujifilm, 2007), (Figs. 59, 60, 61, 62 y 63).

System	
Model	Digital camera FinePix S5 Pro
Effective pixels	12.34 million (S-pixel: 6.17 million, R-pixel: 6.17 million) pixels
CCD	Large-format (23.0 × 15.5 mm) Super CCD SR Pro with primary color filter Total 12.9 megapixels (S-pixels: 6.45 million; R-pixels: 6.45 million)
Storage media	CF card and Microdrive™ (FAT32-compatible) (Compatibility is listed on Fujifilm website: http://home.fujifilm.com/products/digital/)
File format	DCF-compliant Compressed: Exif Ver.2.2 JPEG, DPOF-compatible Uncompressed: CCD-RAW (RAF)*1
Number of recorded pixels	4256×2848 / 3024×2016/2304×1536
File size	See the table on the p.226
Lens mount	Nikon F mount (with AF coupling and AF contacts)
Sensitivity	Auto, ISO 100/125/160/200/250/320/400/500/640/800/1000/1250/1600/2000/2500/3200*2 (Standard Output Sensitivity)
Metering modes	TTL open metering/3D 1005-pixel RGB matrix, Center-weighted, Spot
Exposure control	Program AE, Shutter-priority AE, Aperture-priority AE, Manual exposure
Exposure compensation	-5.0 EV to +5.0 EV 1/3, 1/2, 1 EV step
Shutter	Electronically controlled vertical-travel focal-plane shutter
Shutter speeds	30 to 1/8000 sec, Bulb X contact: Max. 1/250 sec.*3
Auto bracketing	Number of shots 2-9 compensated EV value 1/3 1/2 2/3 1 EV step
Focus	Mode: Single-AF servo, Continuous AF servo, Manual AF system: TTL phase difference detection with auxiliary AF flash AF frame selection: Single-area AF, Dynamic-area AF, Group dynamic AF, Dynamic-area AF with closest subject priority

Fig. 59. Representación de las especificaciones técnicas del sistema de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.

System	
White balance	Automatic scene recognition, Fine, Flash, Shade, Fluorescent(1-5), Incandescent, Choose color TEMP., Preset custom(1-5) *Can be fine tuned.
Self-timer	20 sec./10 sec./5 sec./2 sec.
Flash	Manual pop-up, i-TTL balanced fill-flash for digital SLR, standard i-TTL flash for digital SLR, Guide No.: 12 (ISO 100-m); Sync. shutter speed: 1/250 sec. or slower
Flash modes	Front Synchro, Slow Synchro, Rear synchro, Red-eye Reduction and Red-eye Reduction Slow Synchro
Accessory shoe	Standard ISO-type with hot-shoe contact (Safety lock provided)
Synchro contacts	X contacts only, synchronizing speed: 1/250 sec. or slower
Synchro terminal	Equipped with ISO 519 synchro terminal as standard, lock screw provided
Viewfinder	Eye-level pentaprism (coverage: Approx. 95% vertical and horizontal), dioptic adjustment mechanism, viewfinder magnification approx. 0.94x)
LCD monitor	2.5-inch 230,000-pixels low-temperature polysilicon TFT color LCD panel (approx. 100% coverage for playback)
Remote release	10-pin remote release terminal provided.
Photography functions	Color space selection, dynamic range selection, film simulation mode selection, framing guideline, frame no. memory, multiple exposure shooting, live image
Playback functions	Cropping, slide show, multi-frame playback, histogram display, brightness warning display
Other functions	PictBridge compatibility, Exif Print compatibility, PRINT Image Matching II compatibility, language selection (日本語, English, Francais, Deutsch, Español, Italiano, 中文簡, 繁體, 한글), time difference

Fig. 60. Representación de las especificaciones técnicas del sistema de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.



Input/Output Terminal					
Video output	NTSC/PAL-type				
Digital interface	USB 2.0 High-Speed, MTP/PTP (Picture Transfer Protocol)				
DC input socket	AC Power Adapter AC-135VN (sold separately)				
Power Supply and Others					
Power supply	Use one of the following: Rechargeable Battery NP-150 (included) AC Power Adapter AC-135VN (sold separately)				
Guide to the number of available frames for battery operation	<table> <tr> <th>Battery Type</th><th>With LCD monitor OFF</th></tr> <tr> <td>NP-150 (1500 mAh)</td><td>Approx.400 frames</td></tr> </table> <p>According to the CIPA (Camera & Imaging Products Association) standard procedure for measuring digital still camera battery consumption (extract): Using the battery supplied with the camera and AF50mm/F1.4D lens. The storage media should be CompactFlash card. Pictures should be taken at a temperature of +23°C (+73°F), shoot every 30 seconds with the AF-moved for each shot, the flash used at full power every second shot and the camera turned off and then on again once every 10 shots.</p> <ul style="list-style-type: none"> Note: Because the number of available shots varies depending on the level of charge in the battery, the figures shown here for the number of available shots using the battery is not guaranteed. The number of available shots will also decline at low temperatures. 	Battery Type	With LCD monitor OFF	NP-150 (1500 mAh)	Approx.400 frames
Battery Type	With LCD monitor OFF				
NP-150 (1500 mAh)	Approx.400 frames				
Camera dimensions (W/H/D)	147 mm × 113 mm × 74 mm/5.8 in. × 4.4 in. × 2.9 in. (not including accessories and attachments)				
Camera mass (weight)	Approx. 830 g/29.3 oz. (not including accessories, battery and memory card)				
Operating Conditions	Temperature: 0°C to +40°C (+32°F to +104°F) 80% humidity or less (no condensation)				

- *1 CCD-RAW is a format specific to the FinePix S5 Pro. The enclosed "FinePixViewer" software or the optional Hyper-Utility software "HS-V3" is required to interpret images.
 *2 Images shot in high-sensitivity photography may appear coarse and may also be affected by noise such as white dots.
 *3 Images shot with long exposures may appear coarse and may also be affected by noise such as white dots.

Fig. 61. Representación de las especificaciones técnicas de los terminales de entrada y salida y de alimentación de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.

Memory card capacity and image quality/size

The following table shows the approximate number of pictures that can be stored on a 1 GB memory card at different quality and size settings.

Exposure mode $\frac{1}{4}$, ISO200, focus mode M, [IMAGE DISPLAY] set to [OFF], [QUICK PREVIEW DATA] set to [ON], SanDisk SDCFX (Extreme III) series card

[D-RANGE] set to [100%(STD)]

Image quality	Image size	File size	No. of images	Buffer capacity	Minimum shooting interval
RAW+FINE	L	approx.18.1MB	55	approx.20	Max. 3 frames/sec.
	M	approx.16.3MB	61	approx.21	
	S	approx.15.1MB	66	approx.21	
RAW+NORMAL	L	approx.15.7MB	63	approx.21	
	M	approx.14.8MB	67	approx.21	
	S	approx.14.2MB	70	approx.21	
RAW	—	approx.12.8MB	78	approx.24	
FINE	L	approx.5.3MB	189	approx.29	
	M	approx.3.5MB	285	approx.39	
	S	approx.2.2MB	442	approx.51	
NORMAL	L	approx.2.9MB	345	approx.30	
	M	approx.2.0MB	495	approx.71	
	S	approx.1.4MB	718	approx.80	

Fig. 62. Representación de las especificaciones técnicas de la capacidad de la tarjeta de memoria y de la calidad/tamaño de la imagen de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.



[D-RANGE] set to WIDE (other than [100%(STD)])

Image quality	Image size	File size	No. of images	Buffer capacity	Minimum shooting interval
RAW+FINE	L	approx.30.3MB	32	approx.8	Max. 1.6 frames/sec.
	M	approx.28.6MB	34	approx.8	
	S	approx.27.3MB	36	approx.8	
RAW+NORMAL	L	approx.28.0MB	35	approx.8	
	M	approx.27.1MB	36	approx.8	
	S	approx.26.5MB	37	approx.8	
RAW	–	approx.25.1MB	39	approx.10	
FINE	L	approx.5.3MB	189	approx.19	
	M	approx.3.5MB	285	approx.73	
	S	approx.2.2MB	442	approx.100	
NORMAL	L	approx.2.9MB	345	approx.19	
	M	approx.2.0MB	495	approx.90	
	S	approx.1.4MB	718	approx.100	

Fig. 63. Representación de las especificaciones técnicas de la capacidad de la tarjeta de memoria y de la calidad/tamaño de la imagen de la cámara digital Fujifilm FinePix S5 Pro.



7.2 Trabajo realizado para la obtención del FOV empírico en las distintas escenas

- Escena a 1 m

Se realiza la fotografía en una pared lisa. Primero se utiliza un nivel para observar si el suelo está nivelado horizontalmente, que va a permitir encuadrar el marco (Fig. 64).

Como el suelo está nivelado, se procede a marcar la base del marco, y con la ayuda de una barra metálica y el nivel se marca la alineación vertical (Fig. 65)

A continuación, se marca el centro del marco y el eje vertical y horizontal, formando la cruz del marco, finalmente se termina de definir el perímetro del mismo. El eje servirá de referencia para alinear la fotografía.

A continuación, se coloca la cámara a 102 cm de dpf con el marco y se sitúa la cámara a una altura donde desde el centro del objetivo hasta al suelo haya la misma distancia que desde el suelo al centro del marco (Figs. 66 y 67). De este modo, para encuadrar la fotografía, solo se tiene que desplazar la cámara de forma paralela a la pared. Antes de realizar las fotografías se ha comprobado la nivelación del plano de soporte de la cámara.



Fig. 64. Representación del uso del nivel para la nivelación horizontal del marco.



Fig. 65. Representación del uso del nivel para la nivelación vertical del marco.



Fig. 66. Representación de la posición de la cámara frente el marco.



Fig. 67. Representación de la marca del plano focal justo a 102 cm de la pared lisa.



Después de realizar una serie de fotografías, el marco obtenido a una dpf a la pared de 102 cm es de 110 cm x 72 cm (Fig. 68). Siendo el FOV empírico de 57,62 ° ángulo horizontal, 39,60 ° ángulo vertical y 66,64 ° ángulo diagonal (Tabla 28).

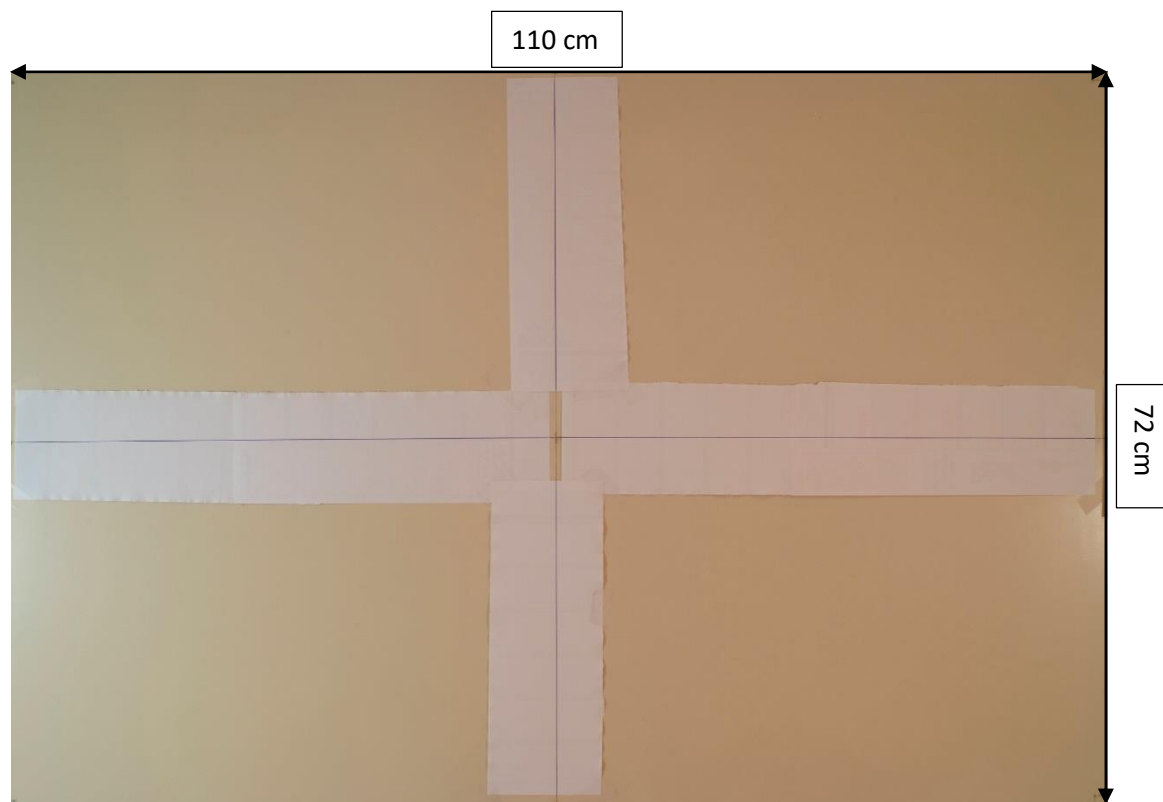


Fig. 68. Representación del marco de referencia de la pared a una distancia del plano focal de 102 cm.

Tabla 28. Representación de la comparación FOV teórico obtenido mediante la dimensión del sensor y de la distancia focal del objetivo y el FOV empírico a una distancia de trabajo de 1 m.

FOV	Ángulo Diagonal	Ángulo Horizontal	Ángulo Vertical
FOV Teórico	69,48 °	59,80 °	42,36 °
FOV Empírico (1 m)	66,64 °	57,62 °	39,60 °

Conocidos los valores del FOV empírico, mediante el marco de referencia de la pared obtenido a 102 cm del plano focal de la cámara a la pared, se podría saber las dimensiones del marco a cualquier distancia. Pero como ha dado un valor distinto al FOV teórico se comprueba que el FOV empírico obtenido sea el mismo para 2 y 3 m de distancia de trabajo.



- Escena a 2 m

El modo de realización del marco es la misma (Figs. 70, 71, 72), pero en este caso, se ha observado que el suelo no estaba nivelado, por lo que se han tenido que ajustar dos listones de madera hasta nivelarlo (Fig. 69).



Fig. 69. Representación del uso del nivel para la nivelación horizontal del marco.



Fig. 70. Representación del uso del nivel para la nivelación vertical del marco.



Fig. 71. Comprobación de la nivelación del plano de soporte de la cámara.



Fig. 72. Representación de los ejes del encuadre fotográfico del marco a una distancia de trabajo de 2 m.



Después de realizar una serie de fotografías, el marco obtenido a una dpf a la pared de 202 cm es de 226 cm x 149 cm (Fig. 73). El FOV empírico se muestra en la Tabla 29.



Fig. 73. Representación del marco de referencia de la pared a una distancia del plano focal de 202 cm.

Tabla 29. Representación de la comparación FOV teórico obtenido mediante la dimensión del sensor y de la distancia focal del objetivo y el FOV empírico a una distancia de trabajo de 1 m y 2 m.

FOV	Ángulo Diagonal	Ángulo Horizontal	Ángulo Vertical
FOV Teórico	69,48 °	59,80 °	42,36 °
FOV Empírico (1 m)	66,64 °	57,62 °	39,60 °
FOV Empírico (2 m)	68,18 °	58,93 °	40,86 °



- Escena a 3 m

El modo de realización del marco es la misma (Figs. 74 y 75).



Fig. 74. Representación de los ejes del encuadre fotográfico del marco a una distancia de trabajo de 3 m.



Fig. 75. Representación de la posición de la cámara frente el marco a una distancia de trabajo de 3 m.



Después de realizar una serie de fotografías, el marco obtenido a una dpf a la pared de 302 cm es de 341 cm x 225 cm (Fig. 76). El FOV empírico se muestra en la Tabla 30.

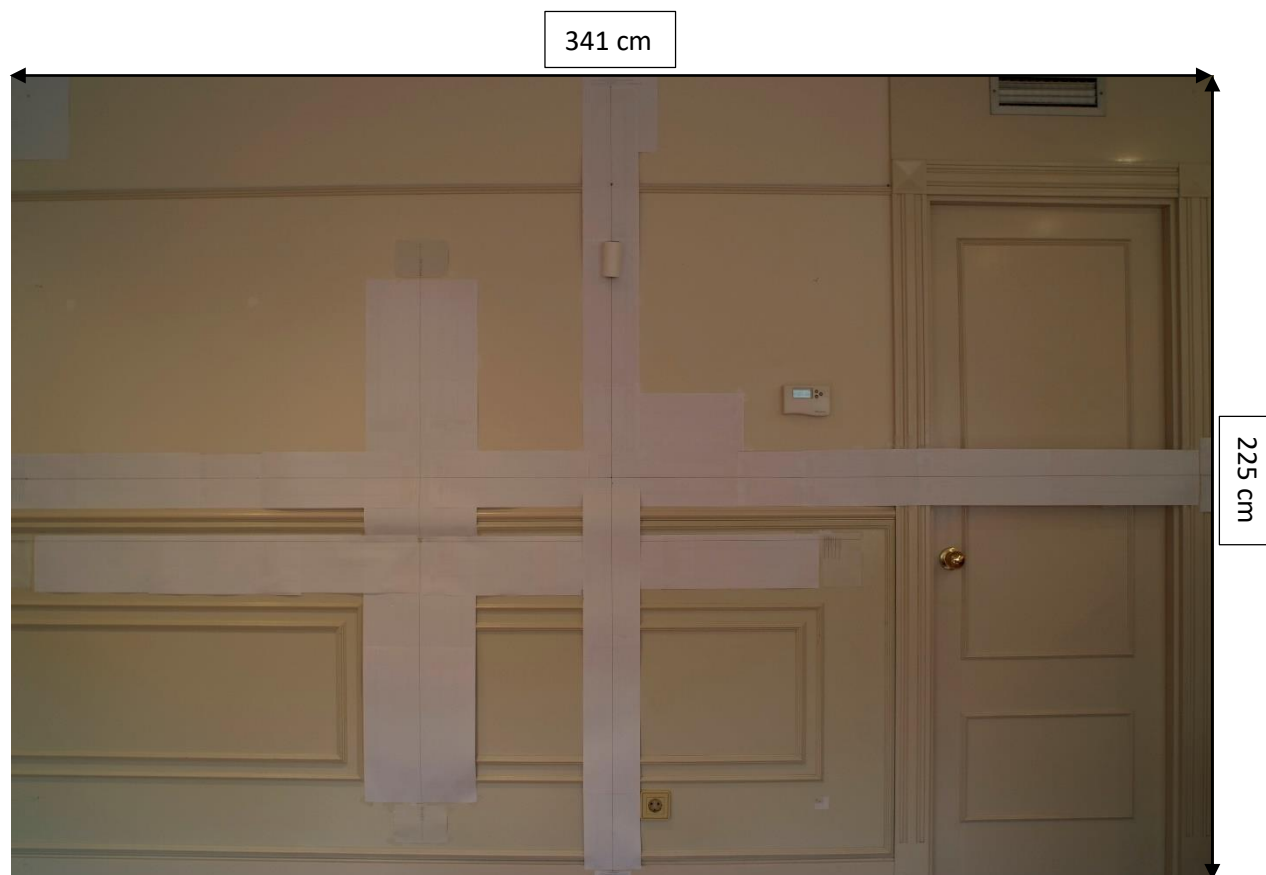


Fig. 76. Representación del marco de referencia de la pared a una distancia del plano focal de 302 cm.

Tabla 30. Representación de la comparación FOV teórico obtenido mediante la dimensión del sensor y de la distancia focal del objetivo y el FOV empírico a una distancia de trabajo de 1 m, 2 m y 3 m.

FOV	Ángulo Diagonal	Ángulo Horizontal	Ángulo Vertical
FOV Teórico	69,48 °	59,80 °	42,36 °
FOV Empírico (1 m)	66,64 °	57,62 °	39,60 °
FOV Empírico (2 m)	68,18 °	58,93 °	40,86 °
FOV Empírico (3 m)	68,50 °	59,22 °	41,11 °



- Escena a infinito

Se ha utilizado el mismo escenario que a 3 m, con todas las medidas marcadas. Pero en vez de realizar un enfoque a 3 m se ha enfocado a infinito. La fotografía no se muestra tan nítida como la realizada con el enfoque de 3 m, pero permite apreciar correctamente el marco que captura el dispositivo fotográfico. Facilitando conocer el FOV de la cámara con el enfoque para largas distancias.

Después de realizar una serie de fotografías, el marco obtenido a una dpf a la pared de 302 cm con el enfoque a infinito es de 342,5 cm x 226 cm (Fig. 77).

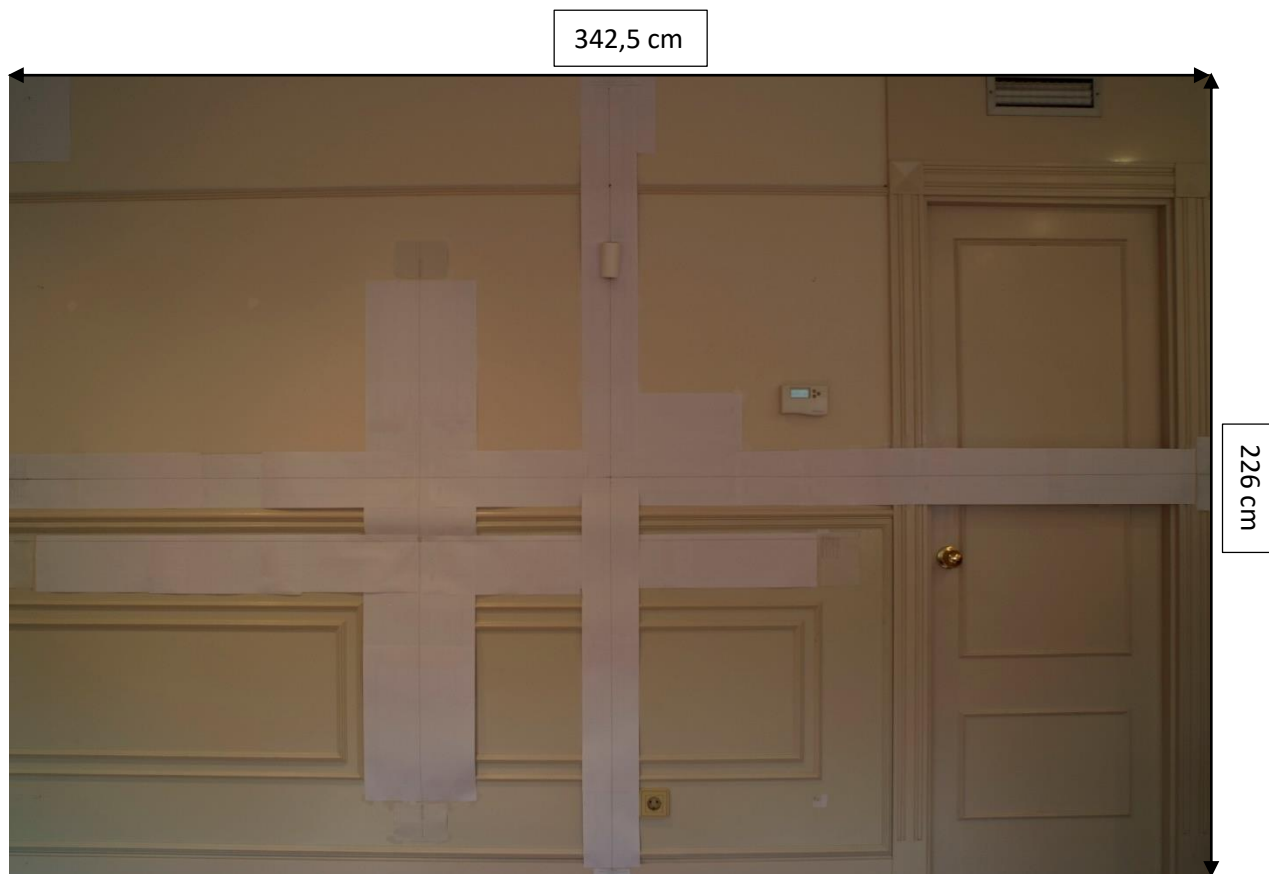


Fig. 77. Representación del marco de referencia de la pared a una distancia del plano focal de 302 cm con el enfoque del objetivo de largas distancias.



7.3 Demostración de la relación del factor de multiplicación

En el apartado del "4.1.2 Cálculo FOV teórico" se ha calculado que el ángulo diagonal teórico de la cámara utilizada es de 69,48 °. Este ángulo sería aproximadamente el mismo en una cámara con sensor Full Frame y una distancia focal de 31,3 mm. Tal como se demuestra a continuación:

- Ángulo diagonal

Se determina la longitud de la mitad diagonal del sensor Full Frame (Fig. 78).

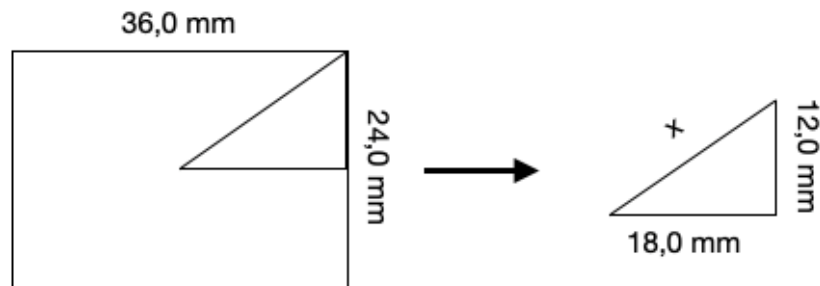


Fig. 78. Representación del tamaño del sensor de la cámara Full Frame, y de la obtención de la mitad de la diagonal.

Mediante el teorema de Pitágoras, se calcula la hipotenusa del triángulo recto, con las dimensiones de la mitad diagonal del sensor Full Frame:

$$x^2 = 18,0^2 + 12,0^2$$

El valor de la hipotenusa o x, es de 21,63 mm.

Conocida la mitad de la diagonal del sensor Full Frame y la distancia focal de 31,3 mm del objetivo, se puede determinar la mitad del ángulo diagonal (Fig. 79). Que sale del plano nodal hasta el plano focal.

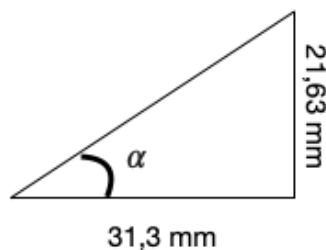


Fig. 79. Representación de la mitad del ángulo diagonal de una cámara Full Frame.

Mediante el arco tangente de α , se puede obtener el valor de la mitad del ángulo diagonal:

$$\arctg(\alpha) = \frac{21,63}{31,30}$$

El valor de α , es de 34,65 °. Por lo tanto, el valor del ángulo diagonal es $34,65^\circ \times 2 = 69,30^\circ$. Este valor es muy cercano a 69,48 °, el ángulo diagonal obtenido con nuestro sensor i una distancia focal de 20 mm. Representado en la Fig. 80.

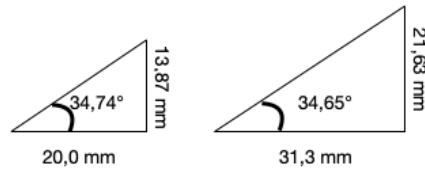


Fig. 80. Representación de la relación entre la mitad del ángulo diagonal de la cámara utilizada (imagen izquierda) y de la cámara Full Frame (imagen derecha).

- Ángulo Horizontal

Para calcular la mitad del ángulo horizontal de la cámara Full Frame, se usa el arco tangente de α :

$$\arctg(\alpha) = \frac{18,0}{31,30}$$

El valor de α , es de $29,90^\circ$. Por lo tanto, el valor del ángulo horizontal es $29,90^\circ \times 2 = 59,80^\circ$. Dando el mismo valor que el ángulo horizontal calculado con nuestro sensor y con un objetivo de 20 mm, mostrado en la Fig. 81.

La cámara utilizada tiene una marca de la posición donde se encuentra el plano focal. En ella se encuentra el sensor. Esta marca, va a permitir conocer la distancia de trabajo y la distancia del plano focal, representado en la Fig. 81.

Entonces, con nuestra cámara, si se quiere tomar una fotografía a un fruto a 4m de distancia de trabajo, se tendrá que colocar la marca del plano focal de la cámara a $400\text{cm} + 2\text{cm}$ del fruto. Es la distancia del plano focal al fruto. Y con la cámara Full Frame con una distancia focal de 3,13cm se tendrá que colocar la marca del plano focal de la cámara a $400\text{cm} + 3,13\text{cm}$ del fruto. Representado en la Fig. 81.

$$dpf = dt + df$$

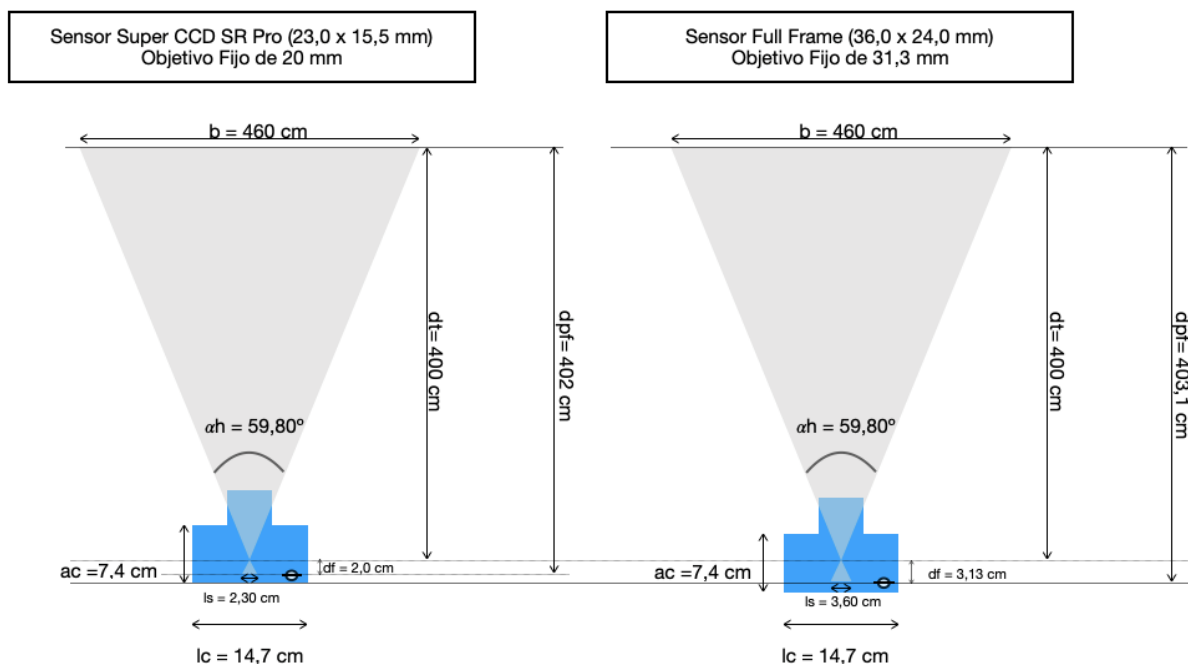


Fig. 81. Representación en planta de la captación del mismo ángulo horizontal, mediante un factor de relación entre cámaras con sensores y objetivos distintas.



- Ángulo vertical

Para calcular la mitad del ángulo vertical de la cámara Full Frame, se usa el arco tangente de α :

$$\arctg(\alpha) = \frac{12,0}{31,30}$$

El valor de α , es de $20,98^\circ$. Por lo tanto, el valor del ángulo vertical es $20,98^\circ \times 2 = 41,96^\circ$. Dando un valor muy similar con el ángulo vertical calculado con nuestro sensor y con un objetivo de 20 mm, mostrado en la Fig. 82.

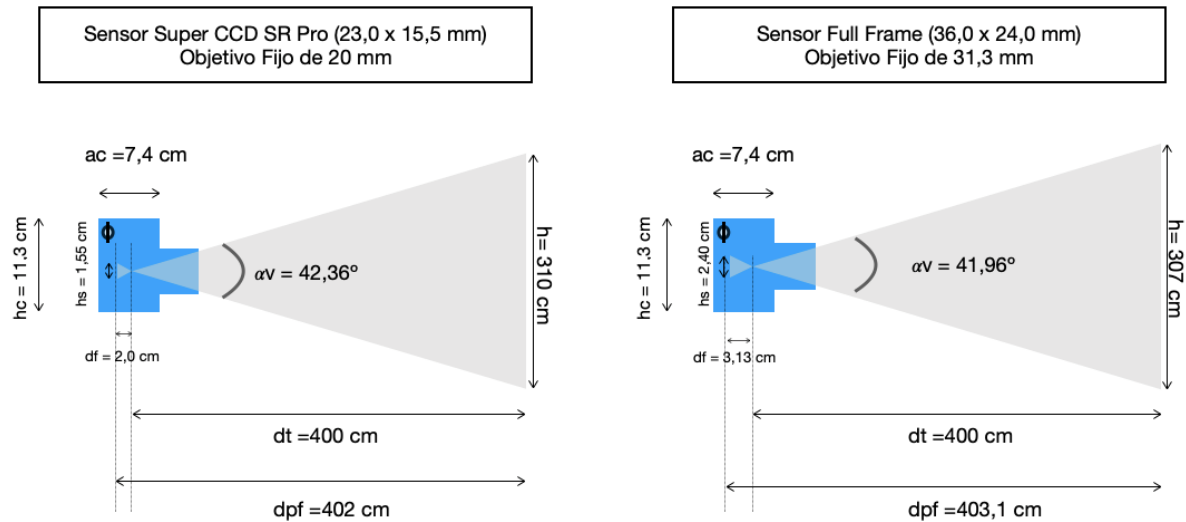


Fig. 82. Representación del perfil de la captación del mismo ángulo vertical, mediante un factor de relación entre cámaras con sensores y objetivos distintos.